

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физико-технический институт  
Направление – физика  
Кафедра общей физики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Исследование влияния никелевого покрытия различной толщины на твердость и сорбцию водорода титановым сплавом ВТ1-0 и циркониевым сплавом Э110
УДК 621.793:546.74:669.295.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Югова И.С.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Кудияров В.Н.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сечина А.А.	к. х. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Федорчук Ю.М.	д. т. н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой общей физики	Лидер А.М.	к. ф.-м. н.		

Томск – 2016

## Запланированные результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Способен самостоятельно приобретать новые знания, использовать современные образовательные и информационные технологии, совершенствовать и развивать свой профессиональный уровень, поддерживать здоровый образ жизни	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-7, ОК-8, ОК-11, ОК-19) <sup>1</sup> , Критерий 5 АИОР
P2	Способен к поиску, обработке и интерпретации с использованием современных информационных технологий данных, необходимых для формирования суждений по соответствующим социальным, научным и этическим проблемам как в коллективе, так и индивидуально (на родном и иностранном языке)	Требования ФГОС (ОК-3, ОК-4, ОК-8, ОК-14, ОК-15, ПК-10, ПК-12, ПК-13,), Критерий 5 АИОР
P3	Способен критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-9, ОК-10, ПК-5, ПК-18), Критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P4	Способен к овладению и применению базовых знаний в области естественных наук и математики для решения профессиональных задач, к усвоению основных педагогических моделей, форм и приемов педагогического воздействия на личность; закономерностей педагогического	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-9, ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2, ПК-10), Критерий 5 АИОР
P5	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, экспериментальные методы исследования конденсированного состояния вещества, методы анализа поверхности твердых тел и тонких пленок	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-14) , Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 2.2, 2.6)
P6	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, современную электронику в электрофизических и плазменных установках, а также учесть взаимодействие излучения и плазмы с веществом, современные достижения водородной энергетики и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР
P7	Способен применить в проектах по тематике, заданной заинтересованными организациями, базовые естественнонаучные и математические знания при получении и исследовании наноматериалов	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-14) , Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 2.2, 2.6)
P8	Способен понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, к применению на практике полученных знаний при обработке, анализе и синтезе полученных физических данных в соответствии с профилем профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-12, ОК-16, ОК-21, ПК-1, ПК-2, , ПК-5, ПК-6, ПК-7), Критерий 5 АИОР
P9	Способен понимать и использовать на практике теоретические основы планирования и организации физических исследований, представлять результаты и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОС (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-14), Критерий 5 АИОР
P10	Способен формировать суждения о значении и последствиях своей профессиональной деятельности с учетом социальных, правовых, этических и природоохранных аспектов, при необходимости применить ресурсо- и энергосберегающие технологии	Требования ФГОС (ОК-10, ОК-11, ПК-1, ПК-2, ПК-7, ПК-9)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физико-технический институт  
Направление – физика  
Кафедра общей физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОБ21	Югова Ирина Сергеевна

Тема работы:

Исследование влияния никелевого покрытия различной толщины на твердость и сорбцию водорода титановым сплавом BT1-0 и циркониевым сплавом Э110	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Образцы титанового сплава BT1-0 и циркониевого сплава Э110.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Обзор по литературным источникам;</li> <li>нанесение покрытий;</li> <li>насыщение образцов водородом;</li> <li>определение твердости;</li> <li>анализ полученных результатов;</li> <li>социальная ответственность;</li> <li>финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>заключение.</li> </ul>
--	---

### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М., профессор ЭБЖ ИНК
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина А.А., доцент МЕН ИСГТ
Иностранный язык	Данейкина Н.В., старший преподаватель ИЯФТ ФТИ

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Глава 2. Материалы и методы исследований

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОФ ФТИ	Кудияров Виктор Николаевич			

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Югова Ирина Сергеевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б21	Югова Ирина Сергеевна

<b>Институт</b>	Физико-технический	<b>Кафедра</b>	Общей физики
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление</b>	03.03.02. Физика

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Целью данной работы является исследование влияния никелевого покрытия различной толщины на твердость и сорбцию водорода титановым сплавом BT1-0 и циркониевым сплавом Э110.
2. Описание рабочего места на предмет возникновения:
  - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия и освещенность на рабочем месте, шум и вибрация от установок, электромагнитные поля от магнетрона);
  - опасных проявлений факторов производственной среды (утечка газа, взрыв, возгорание);
  - негативные воздействия на окружающую среду (отходы: использованная наждачная бумага, перчатки и т.д.);
  - чрезвычайных ситуаций (экологического и техногенного характера).

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ вредных факторов производственной среды представлен в следующей последовательности:
  - а) приводятся данные по оптимальным и допустимым значениям микроклимата и звукового давления;
  - б) рассчитывается освещенность на рабочем месте;
  - в) приводятся данные по допустимым значениям электромагнитных полей на рабочем месте и средства защиты.
2. Анализ опасных факторов производственной среды представлен в следующей последовательности:
  - а) приводится классификация помещения по электробезопасности, допустимые безопасные для человека значения напряжения, тока;
  - б) приводится классификация пожароопасности помещений, указывается класс пожароопасности;
  - в) представлен план эвакуации из лаборатории.
3. Охрана окружающей среды:  
организация безотходного производства.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:
  - а) приводятся возможные чрезвычайные ситуации (природная – сильные морозы, техногенная – предполагаемая диверсия);
  - б) разрабатываются меры по предупреждению чрезвычайных ситуаций;
  - в) разрабатываются действия в результате возникшей чрезвычайной ситуации и меры по ликвидации ее последствий
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:  
специальные правовые нормы трудового законодательства (приводится перечень ГОСТов, СНиПов и др. законодательных документов).

### Перечень графического материала:

1. план размещения светильников на потолке рабочего помещения;
2. пути эвакуации.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Д. Т. Н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Югова Ирина Сергеевна		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б21	Югова Ирина Сергеевна

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общая физика
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость сырья и материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Согласно проектной документации
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Разработка анализа конкурентоспособности
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка сравнительной и финансовой эффективности

## Перечень графического материала:

1. Матрица SWOT
2. График проведения и бюджет научного исследования
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности научного исследования

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечина Ася Александровна	К. Х. Н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Югова Ирина Сергеевна		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 83 страницы, 15 рисунков, 22 таблицы, 61 литературный источник, 1 приложение.

Ключевые слова: водородная хрупкость, твердость, размерный эффект. нанесение покрытий, поглощение водорода, титановый сплав, циркониевый сплав.

Объектом исследования являются образцы титанового сплава BT1-0 и циркониевого сплава Э110.

Цель работы – исследование влияния никелевого покрытия различной толщины на твердость и сорбцию водорода титановым сплавом BT1-0 и циркониевым сплавом Э110.

В процессе исследования проводились нанесение никелевого слоя различной толщины, определение твердости, насыщение водородом.

В результате исследования установлено, никелевое покрытие влияет на поверхностную твердость поверхностей образцов и скорость сорбции.

Область применения: результаты работы могут быть использованы при подготовке образцов титанового и циркониевого сплавов с различными концентрациями водорода.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	10
Глава 1. Взаимодействие водорода с металлами .....	12
1.1. Взаимодействие водорода с титаном и цирконием .....	15
1.2. Взаимодействие никеля с водородом.....	20
1.3. Подготовка металлических образцов.....	21
Глава 2. Материалы и методы исследований.....	23
2.1. Нанесение покрытий.....	23
2.2. Определение толщины покрытия.....	26
2.3. Насыщение водородом из газовой среды .....	28
2.4. Измерение твердости .....	29
Глава 3. Экспериментальные результаты .....	32
Глава 4. Социальная ответственность.....	37
4.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	37
4.1.1 Метеоусловия .....	37
4.1.2 Производственный шум .....	39
4.1.3 Освещенность.....	41
4.1.4 Электромагнитные поля.....	43
4.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	44
4.2.1 Факторы электрической природы .....	44
4.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы.....	45
4.3 Охрана окружающей среды .....	47
4.4 Защита в ЧС .....	48
4.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	49
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	51
5.1 SWOT-анализ.....	51
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	54
5.2.1 Структура научно-исследовательских работ .....	54



5.2.2 Разработка графика научного исследования.....	55
5.2.3 Бюджет научно-технического исследования .....	60
5.3 Определение сравнительной эффективности исследования .....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	68
Список использованных источников .....	69
Приложение А .....	75

## **ВВЕДЕНИЕ**

Титановые и циркониевые сплавы в качестве конструкционного материала широко используются в различных отраслях промышленности. Титан применяется в химическом машиностроении, самолето- и ракетостроении благодаря его высокому сопротивлению, коррозионной стойкости и жаропрочности. Цирконий является очень важным конструкционным материалом в ядерной энергетике, так как обладает малым сечением захвата тепловых нейтронов и высокой механической прочностью при повышенных температурах [1-5].

Механические свойства титановых и циркониевых сплавов существенно зависят от наличия в них примесей, которые повышают прочность, но снижают пластичность материала. К таким примесям относятся кислород, азот, углерод, водород [6, 7]. Особенно вреден водород, который из-за образования гидридов вызывает охрупчивание металла. Поэтому его содержание не должно превышать 0,015 масс.% [4].

Титан при нагреве активно поглощает водород, и чем выше температура, тем интенсивнее идет процесс поглощения. В атмосфере свободного водорода почти нет. Он образуется из паров воды, которые разлагаются с образованием оксидной пленки [8]. Водород может проникать в титановые сплавы при технологических операциях, особенно связанных с травлением полуфабрикатов, а также в процессе эксплуатации. Поэтому при применении титановых сплавов необходимо учитывать вероятность возникновения водородной хрупкости, которая опасна из-за наличия внутренних напряжений [9, 10].

В процессе эксплуатации циркониевые оболочки тепловыделяющих элементов водоохлаждаемых энергетических атомных реакторов окисляются и наводороживаются. Водород выделяется в результате взаимодействия циркониевых сплавов с теплоносителем (водой или парами воды) при высоких температуре и давлении. При этом образуются гидриды, которые резко

ухудшают механические свойства циркониевых сплавов. С образованием гидридов связан такой механизм разрушения, как замедленное гидридное растрескивание. Проникновение водорода в циркониевые оболочки опасно тем, что оно может привести к попаданию ядерного топлива в теплоноситель [2].

Для изучения явления водородной хрупкости в титановых и циркониевых сплавах необходима подготовка экспериментальных образцов с различными концентрациями водорода для проведения механических испытаний. Однако наводороживание зачастую затруднено из-за наличия на поверхности окисной пленки [1,11], которая значительно снижает скорость сорбции водорода, особенно при низких температурах. Для повышения скорости сорбции может быть использован метод плазменной очистки поверхности для удаления окисной пленки и последующее напыление слоя никеля микронной толщины. Никелевый слой существенно снижает скорость образования окисной пленки, а так же активно взаимодействует с водородом даже при низких температурах [12].

Изучение явления водородной хрупкости в титановых и циркониевых сплавах зачастую заключается в проведении различных механических испытаний сплавов с водородом. При подготовке экспериментальных образцов с водородом для механических испытаний важно знать, влияет ли нанесение слоя никеля на механические свойства.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния никелевого покрытия различной толщины на твердость и сорбцию водорода титановым сплавом ВТ1-0 и циркониевым сплавом Э110.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: подготовить образцы титанового сплава ВТ1-0 и циркониевого сплава Э110 с различными толщинами никелевого покрытия, определить твердость образцов до и после нанесения слоев никеля различной толщины, провести наводороживание и определить скорости сорбции водорода образцами до и после нанесения слоев никеля различной толщины.

## Глава 1. Взаимодействие водорода с металлами

С растворимостью водорода в металлах связана его способность диффундировать через металлы. Водород – легкий газ, поэтому он обладает высокой скоростью диффузии. Его способность к диффузии велика при высоких давлении и температуре [5]. Находящиеся в металле атомы водорода смещают атомы металла из положений равновесия, вызывая при этом расширение решетки, что является причиной появления технических проблем при использовании конструкционных материалов.

Водород взаимодействует почти со всеми металлами, и может находиться в них в следующих состояниях: растворяться в объеме, адсорбироваться на поверхности микронесплошностей, скапливаться в микропорах в молекулярной форме, образовывать гидриды и взаимодействовать с легирующими элементами [13]. Состояние и распределение водорода, а также его количество в металлах зависит от несовершенств кристаллической структуры.

Основные процессы взаимодействия водорода с поверхностью металлов представлены на рисунке 1.

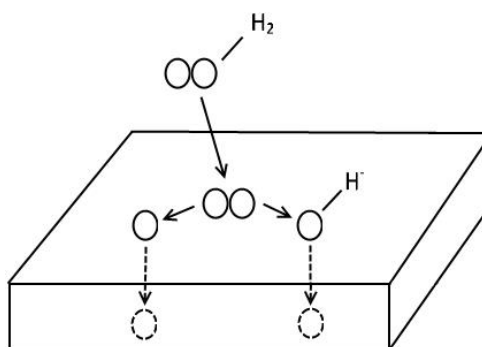


Рисунок 1 – Взаимодействие водорода с поверхностью металлов

Взаимодействие водорода с металлами включает физическую и химическую адсорбцию, диффузию, растворение и образование химических соединений. При контакте металла с водородом, на его поверхности образуется слой адсорбированного газа. При физической адсорбции между поверхностью и молекулами водорода возникают силы Ван-дер-Ваальса, при этом переноса

электронов не происходит и молекулы водорода не диссоциируют на атомы. При химической адсорбции между атомами поверхности и молекулами водорода возникает ковалентная или какая-либо другая связь вследствие обмена электронами. Адсорбция ускоряется с повышением температуры. В процессе химической адсорбции молекулы водорода распадаются на атомы, затем – протоны, которые обладают высокой подвижностью [14] и, преодолев энергетический барьер, диффундируют вглубь металла. Далее происходит растворение водорода в металле – наводороживание. [13, 15, 16].

Поскольку водород является диффузионно-подвижным, одновременно могут происходить и обратные процессы, такие как передвижение протонов из объёма к поверхности металла, превращение протонов в атомы водорода, появление молекулярного водорода вследствие рекомбинации на поверхности металла и десорбция молекулярного водорода в газовую фазу [16].

Поглощение водорода может сопровождаться образованием твердых растворов или химических соединений. Например, при 300 °С в титане сначала образуется твердый раствор. Когда концентрация водорода достигает 0,15 масс.% (раствор водорода становится насыщенным), начинается образование гидридной фазы [13]. Проникновение водорода и его распределение в объеме металла называется абсорбцией. В зависимости от знака теплового эффекта, она делится на эндотермическую и экзотермическую. Эндотермическая абсорбция протекает с поглощением тепла, и поэтому количество абсорбированного водорода возрастает с повышением температуры. В металлах, поглощающих водород по эндотермической реакции, теплота абсорбции водорода положительна. При данной абсорбции гидриды не образуются. Экзотермическая абсорбция протекает с выделением тепла, и поэтому содержание водорода в металле с повышением температуры уменьшается. Металлы, поглощающие водород по экзотермической реакции образуют гидриды – к ним относятся титан и цирконий [9].

Гидриды по характеру связи атомов водорода с металлами подразделяются на ковалентные, ионные и металлические. В титане и цирконии образуются металлические гидриды, которые представляют собой твердые растворы. Для этого типа гидридов характерно увеличение объема, вследствие которого возникают внутренние напряжения в металле. Металлические гидриды, как правило, хрупкие [16].

Атомы водорода в переходных металлах ионизируются под влиянием потенциального поля металла с образованием положительно заряженного иона – протона, либо отрицательно заряженного иона. В случае образования протона тип решетки и металлические свойства металла сохраняются, а в случае образования отрицательно заряженного иона – возникает химическое соединение с ионным типом связи, обладающее специфической решеткой и не имеющее металлических свойств [14,16].

Протон образуется, если ионизационный потенциал атомов металла выше 7 эВ и s-электроны водорода переходят на незаполненную d-оболочку металла с более низким энергетическим уровнем. В том случае, если ионизационный потенциал менее 7 эВ, металл отдает электроны атомам водорода и образуются отрицательно заряженные ионы или гидриды [16].

Состояние водорода в виде протонов в решетке переходных металлов подтверждается экспериментальными результатами, которые свидетельствуют об изменении намагниченности этих металлов. Причиной ионизации атомов водорода считается воздействие силового электрического поля решетки, к примеру, никеля. После хемосорбции водорода намагниченность никеля уменьшается, что означает заполнение d-уровня электронами атомов водорода.

Если бы в металлах происходила полная ионизация водорода до протона, то в связи с его малым размером, растворимость и константы диффузии не зависели бы от величины зазоров между атомами в решетке металла, между которыми диффундируют атомы водорода. На самом деле растворимость и диффузионная подвижность атомов водорода в металлах

определяются параметрами кристаллической решетки, что свидетельствует о большом размере атома водорода по сравнению с протоном. Также на относительно большой размер атомов водорода в твердых растворах указывает повышение сопротивления пластической деформации этих растворов. Исходя из этого, можно заключить, что водород в металлах не ионизируется полностью.

Области металла, в которых концентрируется свободный атомарный водород с низкой свободной энергией по сравнению с его энергией в решётке, называются ловушками, а области скопления связанного молекулярного водорода – коллекторами. Ловушки классифицируются по нескольким признакам: открытые и закрытые, обратимые и необратимые, насыщаемые и ненасыщаемые, подвижные и неподвижные. Также они подразделяются на точечные, к которым относятся вакансии, атомы замещения и внедрения; линейные – краевые и винтовые дислокации, дислокационные пороги, пересечения трёх границ зёрен; двумерные – межзёренные, межфазные и двойниковые границы; объёмные – области объёмного растяжения, скопления дислокаций, поры и несплошности [16].

О проблеме водородного охрупчивания говорится в источниках [15-20]. Высокая концентрация водорода в титановых и циркониевых сплавах приводит к резкому уменьшению пластичности при увеличении прочностных характеристик из-за образования гидридных фаз.

### **1.1. Взаимодействие водорода с титаном и цирконием**

Титан и цирконий имеют две аллотропические модификации –  $\alpha$  (гексагональная плотноупакованная решетка) и  $\beta$  (объемноцентрированная решетка) с температурами фазового перехода 882 и 863 °C соответственно.

В обычных условиях титан и цирконий имеют высокую коррозионную стойкость, что обусловлено стабильностью оксидных пленок на поверхности и высокими точками плавления. При повышенных температурах, в несколько сот

градусов, эти металлы обладают высокой реакционной способностью, которая выражается в активном поглощении любых газов, кроме инертных. При поглощении водорода титаном цирконием образуются гидриды, твердые растворы внедрения и ряд производных фаз. Если на поверхности металла отсутствует оксидная пленка, то поглощение происходит уже при комнатной температуре [20].

На рисунке 2 представлены диаграммы состояния титан-водород (а) и цирконий-водород (б).

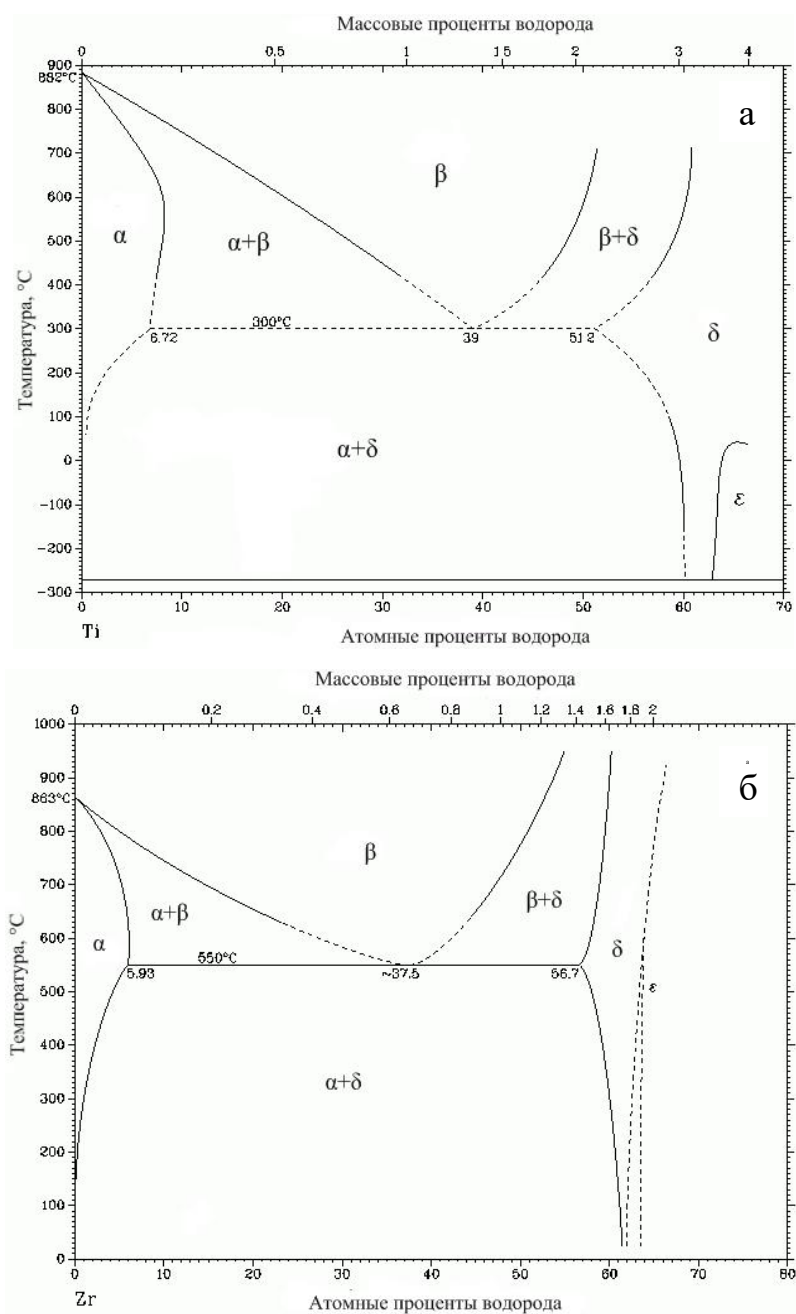


Рисунок 2 – Диаграммы состояния Ti-H (а) и Zr-H (б) [21]



В системах имеются фазы –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  и их гетерогенные области ( $\alpha+\beta$ ,  $\beta+\delta$  и  $\alpha+\delta$ ,  $\delta+\epsilon$ ).  $\alpha$  и  $\beta$  – твердые растворы водорода, которые имеют гексагональную плотноупакованную и объемноцентрированную кубическую решетки соответственно;  $\delta$  – нестехиометрический дигидрид  $ZrH_{2-y}$  с гранецентрированной кубической решеткой и  $\epsilon$  – дигидрид  $ZrH_{2-x}$  с гранецентрированной тетрагональной решеткой [22].

$\alpha$ -фаза – твердый раствор водорода, в титане гомогенен до 7,8 ат.%, в цирконии – до 6 ат.%. При дальнейшем повышении концентрации водорода при температурах 300 °C и 550 °C появляется сначала двухфазная  $\alpha+\beta$ -область, затем –  $\beta$ -фаза, которая переходит в двухфазную  $\beta+\delta$ -область при 39 и 37,5 ат.% для титана и циркония соответственно. При ещё более увеличенных концентрациях водорода образуются  $\delta$ - и  $\epsilon$ -фазы, которые представляют собой гидриды титана  $TiH_2$  и циркония  $ZrH_2$  [23, 24]. При понижении температуры до комнатной  $\alpha$ -,  $\alpha+\beta$ -,  $\beta$ -,  $\beta+\delta$ -фазы переходят в  $\alpha+\delta$ -фазу, а  $\delta$ -фаза остается твердым раствором на основе гидроксида. Наличие водорода понижает температуру аллотропического превращения титана и циркония [15, 20, 25].

Водород в объеме металла распределяется неравномерно, накапливаясь в ловушках с образованием твердых растворов и химических соединений. При поглощении водорода титаном и цирконием вначале образуется твердый насыщенный раствор, затем поступающий водород расходуется на образование гидридов. Поэтому общее содержание абсорбированного водорода оказывается больше количества растворенного.

Отожженный в высоком вакууме титан начинает поглощать водород при комнатной температуре, и с повышением температуры скорость поглощения растет [26], также как и цирконий взаимодействует с водородом при низких температурах [27].

Препятствует поглощению водорода оксидная пленка на поверхности металлов [28], которая образуется вследствие того, что гидридообразующие металлы имеют большее сродство к кислороду, чем к водороду. С увеличением

содержания водорода в титановых и циркониевых сплавах возникает водородная хрупкость, которая связана с выделением гидридов пластинчатой формы вдоль плоскостей скольжения [12, 24, 29]. Они занимают большой объем по сравнению с основным металлом, создавая объемно-напряженное состояние в решетке [30]. Из-за внутренних напряжений вдоль гидридов образуются трещины [23].

Участками выделения гидридной фазы являются скопления дислокаций, границы двойников и зерен. Соотношение между числом гидридов, которые выделяются по границам и внутри зерен, зависит от концентрации водорода и скорости охлаждения сплава — чем они выше, тем меньше доля межкристаллитных гидридов. Форма выделений определяется поверхностной энергией и энергией упругой деформации матрицы. При медленном охлаждении образцов гидриды имеют пластинчатую форму, при быстром — иглообразную. При увеличении скорости охлаждения размеры гидридов уменьшаются [2].

Малая растворимость водорода в  $\alpha$ -фазе и переориентация гидридов под действием напряжений приводят к процессу замедленного гидридного растрескивания в титановых и циркониевых сплавах. Это разрушение происходит при диффузии водорода в вершину трещины под действием напряжений и образовании гидроксида [23, 24].

Гексагональная плотноупакованная решетка имеет два вида пустот, где могут размещаться внедренные атомы: тетраэдрические и октаэдрические (рисунок 3).

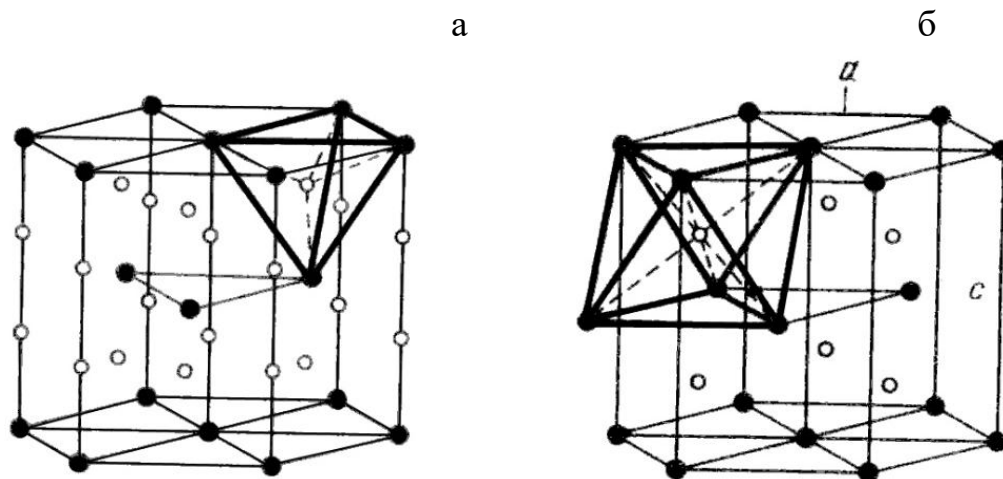


Рисунок 3 – Тетраэдрические (а) и октаэдрические (б) пустоты в гексагональной плотноупакованной решетке [31]

В решетке титана атомы водорода, радиус которых равен  $0,41 \text{ \AA}$ , располагаются в октаэдрических пустотах, в решетке циркония – в тетраэдрических пустотах (октапоры занимают атомы кислорода) [2, 15, 32, 33].

Радиус атомов водорода значительно меньше размера октаэдрических пустот в титане, поэтому при их внедрении происходит уменьшение свободной энергии системы и, благодаря химическому взаимодействию, ее повышение, обусловленное большой свободой колебаний атомов водорода – по этой причине растворимость водорода в  $\alpha$ -фазе мала [25]. При низких концентрациях твердые растворы водорода в  $\alpha$ -титане становятся термодинамически неустойчивыми [25, 33].

В  $\beta$ -титане размеры пустот почти совпадают с радиусом атомов водорода, и повышения свободной энергии, обусловленного свободой колебаний атомов в междоузлиях, не происходит. Поэтому водород хорошо растворяется в этой фазе [25].

Кристаллографическое строение гидрида зависит от содержания в нем водорода и температуры. В интервале составов от  $\text{TiH}_{1,53}$  до  $\text{TiH}_{1,90}$  гидрид имеет гранецентрированную решетку, периоды которой меняются от  $4,407 \text{ \AA}$  до  $4,434 \text{ \AA}$ . При содержании водорода в гидриде выше  $\text{TiH}_{1,90}$  решетка гидрида тетрагонально искажается – при этом происходит постепенное сжатие элементарной ячейки вдоль оси  $c$  и расширение вдоль оси  $a$ . Соотношение осей

$c/a$  становится меньше единицы и резко уменьшается с увеличением содержания водорода. При поглощении водорода происходит увеличение объема за счет того, что плотность гидрида меньше плотности титана [25].

Основной источник водорода при работе циркониевых изделий – газообразный водород, который образуется при взаимодействии циркония с водой. Растворимость водорода в  $\alpha$ -Zr мала, поэтому он образует с цирконием гидриды  $ZrH_2$ . При температурах 350...400  $^{\circ}C$  в цирконии растворяется 1,5 ат.% водорода, поэтому одна часть водорода находится в гидридах, другая – в твердом растворе. При температуре 20  $^{\circ}C$  почти весь водород находится в гидридах [24]. Повышение концентрации водорода в цирконии при температурах ниже температуры полиморфного превращения (863  $^{\circ}C$ ) приводит к концентрационному превращению, которое заключается в переходе от  $\alpha$  к  $\alpha+\beta$ , затем к  $\beta$ -области при последующем повышении содержания водорода [34].

Гидриды титана и циркония, состав которых соответствует формуле  $MeH_2$ , представляют собой хрупкие порошки. Они не вступают в реакции с большинством веществ, за исключением сильных окислителей, но теряют часть водорода при хранении на воздухе. При поджигании гидриды сгорают с большим выделением тепла [20].

## **1.2. Взаимодействие никеля с водородом**

Включение водорода в покрытия и металл подложки осуществляется с помощью адсорбции, которая быстро протекает на никеле [35].

Никель активно взаимодействует с водородом. При низких температурах он легко адсорбирует водород, с повышением температуры количество адсорбированного водорода уменьшается [12]. Система никель-водород подчиняется закону Генри, который предусматривает линейную зависимость растворимости от  $\sqrt{p_{H_2}}$ . Растворяющийся водород изменяет параметр решетки

никеля не более чем на 0,0005 Å, растворимость зависит от чистоты, структуры и состояния металла, его термообработки и наличия напряжений [36].

Растворимость водорода в никеле значительно выше растворимости в других металлах подгруппы железа и меди. Высокая растворимость водорода в никеле объясняется тем, что атомы никеля имеют малый диаметр, и водород легко внедряется в кристаллическую решетку. Растворимость в никеле увеличивается с повышением температуры, при которой водород находится в атомарном состоянии. Никель имеет низкую химическую активность, на его поверхности образуется тонкая защитная пленка, которая препятствует дальнейшему окислению [37].

Повышенная каталитическая активность никеля может объясняться наличием незаполненного *d*-уровня [38].

Никель обладает высокой работой выхода по сравнению с другими металлами, т. к. при низкой работе выхода молекула водорода не будет взаимодействовать с поверхностью и разлагаться на атомы. На кристаллических плоскостях с высокой работой выхода происходит следующий процесс: при наличии достаточной термической энергии, необходимой для активации, молекула водорода, ударяясь о поверхность, распадается на атомы, которые отдают свои электроны металлу [39].

Благодаря высокой адсорбционной способности водорода, его применяют в качестве катализатора в различных реакциях органической химии [40].

### **1.3. Подготовка металлических образцов**

Подготовку плоскости следует проводить с минимальным искажением структуры металла. Абразивная подготовка образцов заключается в срезании неровностей абразивными частицами. Обработку производят в несколько стадий, постепенно уменьшая крупность этих частиц [41]. Совершенно недопустим переход от грубых шлифовальных бумаг к самым тонким, т. к.

грубые штрихи от предыдущей обработки забиваются порошком мелкого абразива и металлической пылью, что создает ложное впечатление хорошей шлифовки.

При ручном способе шлифования на жесткую плоскую подкладку (толстое стекло или лист металла), расположенную горизонтально, кладут шлифовальную бумагу. Образец и шлифуют последовательно во взаимно перпендикулярных направлениях с легким нажимом до полного уничтожения рисок. Закончив шлифование на бумаге с самым мелким зерном, образец промывают водой и полируют.

Шлифование образцов механическим способом проводится на шлифовальных станках. Шлифовальный станок представляет собой один или несколько металлических кругов, которые приводятся в движение с помощью электродвигателей. На металлические круги накладывают или наклеивают круги, вырезанные из шлифовальной бумаги. При механическом шлифовании, так же, как и при ручном, меняют шлифовальные бумаги, последовательно переходя от крупнозернистых к мелкозернистым. При механическом шлифовании образцы часто нагреваются, поэтому периодически их нужно охлаждать в воде.

Образцы можно шлифовать на абразивных порошках или пастах. Шлифовку на порошках проводят на дисках при влажном состоянии абразива такими же приемами, как и шлифовку на шкурках. Суспензию готовят смешиванием воды и порошка в отношении 20:1. Пасты непригодны для грубой шлифовки.

## **Глава 2. Материалы и методы исследований**

В процессе исследований использовались образцы титанового сплава BT1-0 размером 20x20x1 мм и образцы циркониевого сплава Э110 размером 20x20x0,6 мм

Титановый сплав BT1-0 (технический титан) содержит в масс. %: титан – 99,2; железо – 0,18; углерод – 0,07; кремний – 0,1; азот – 0,04; кислород – 0,12; водород – 0,01 и другие примеси – 0,3 [10]. Циркониевый сплав содержит 99 масс. % циркония и 1 масс. % ниобия.

С помощью наждачных бумаг с разным размером зерна были отшлифованы поверхности образцов, затем проведен вакуумный отжиг титана при температуре 750°C в течение 60 мин и циркония при температуре 580°C в течение 180 мин.

### **2.1. Нанесение покрытий**

Напыление никелевого слоя на поверхности образцов осуществлялось на установке «Радуга-спектр», которая предназначена для реализации гибридных технологий ионно-плазменной модификации свойств поверхностных слоев, включая нанесение однослойных и многослойных покрытий широкой номенклатуры способом конденсации вещества с ионным ассистированием на изделия. Схема установки представлена на рисунке 4.

В состав установки входят: вакуумная камера; источник ионов газов; источник газовой плазмы; вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы; источник ускоренных электронов; магнетрон; источник потенциала смещения; система водоохлаждения; вакуумная система; система питания; стойка с системой напуска газов и их смесей; стойка с системой управления и питания; стойка установки.

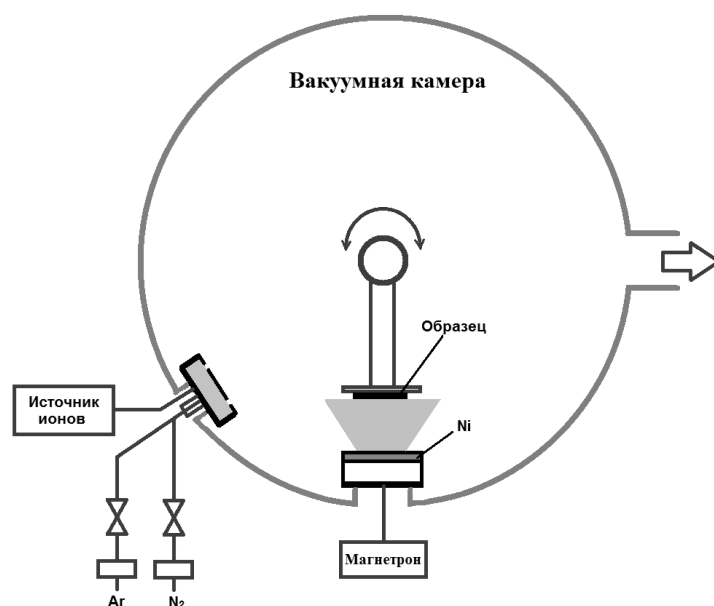


Рисунок 4 – Схема установки «Радуга-спектр»

Источник ионов предназначен для очистки поверхности материалов в вакуумной камере перед нанесением на них покрытий методом напыления. Очистка поверхности осуществляется путем распыления атомов в результате рассеяния на них ускоренных ионов, создаваемых источником ионов. Ионная очистка производится способом ускоренных ионов газов, предварительно ускоренных в диодной системе прямого действия, энергия ионов лежит в диапазоне 0... 3,5 кэВ.

В качестве генераторов плазмы в составе установки применены вакуумно-дуговой испаритель и магнетрон.

Магнетрон предназначен для нанесения металлических и оксидных тонкопленочных покрытий на различные материалы. Принцип действия основан на распылении поверхности мишени плазмой газового разряда, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях (рисунок 5).



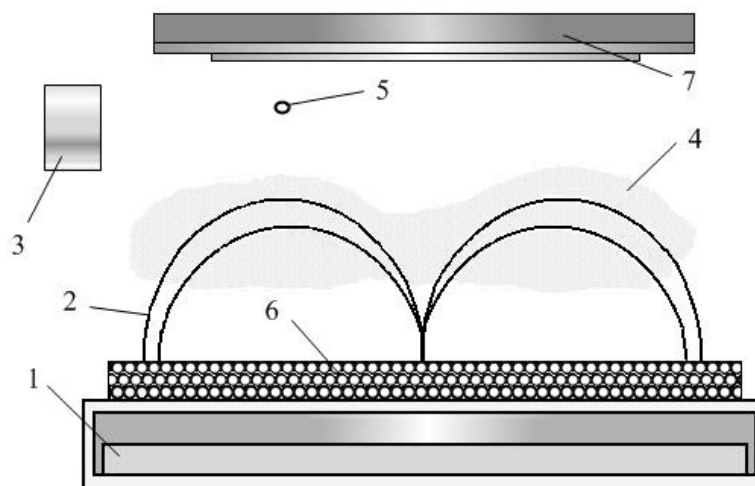


Рисунок 5 – Принцип работы магнетрона: 1 – катод, 2 – мишень, 3 – плазма, 4 – подложка, 5 – атом распыляемого материала, 6 – аргоновая пушка, 7 – магнитные силовые линии

Магнетрон представляет собой двухэлектродную систему, катодом в которой является распыляемый материал (1). Линии магнитного поля (2) перпендикулярны линиям электрического поля и проходят через поверхность катода. С помощью аргоновой пушки (3) создается плазма низкого давления (4) над катодом и производится распыление атомов (5) мишени (6) и их осаждение на подложку (7) [42]. С помощью сильного магнитного поля достигается локализация плазмы вблизи поверхности распыляемой мишени и увеличивается плотность ионного тока [43].

На базе установки реализован режим ионной очистки и активации поверхности обрабатываемых изделий на основе использования вакуумно-дугового генератора плазмы непрерывного действия. Нанесение покрытия производится способом конденсации вещества из плазмы на поверхность обрабатываемого изделия в вакууме с плазменно-иммерсионным ионным assisteрованием.

Обрабатываемые изделия размещаются на панели механизма вращения, расположенной в средней части вакуумной камеры. Загрузка изделий в вакуумную камеру производится через дверь камеры. Пониженное давление в рабочей камере установки создается вакуумной системой, размещенной вблизи

стойки установки. Для предохранения узлов установки от перегрева используется система водоохлаждения.

Образцы закреплялись на держатель и помещались в камеру установки. Предельное остаточное давление в камере составляло  $2,5 \cdot 10^{-3}$  Па. Очистка поверхности проводилась непосредственно в камере установки перед напылением покрытия, ионным пучком аргона, при параметрах, представленных в таблице 1. Нанесение никелевого покрытия осуществлялось методом магнетронного распыления в режимах, представленных в таблице 2. В качестве мишени использовался никель марки Н0, степень чистоты которого 99,99%.

Таблица 1 – Параметры ионной очистки поверхности

Газ	U, В	W, Вт	I, А	P, Па	t, мин
Ar	1800-2000	1000	0,5	$6 \cdot 10^{-2}$	3

Таблица 2 – Параметры магнетронного распыления никеля

U, В	W, Вт	I, А	P, Па
540	2000	3	$1,1 \cdot 10^{-1}$

Использование ферромагнитной мишени должно привести к тому, что магнитный поток замкнется внутри мишени, и магнитный разряд не возникает. Но в данной работе используется мишень малой толщины для того, чтобы магнитный поток, создаваемый в магнитной системе магнетрона, приводил материал мишени в состояние магнитного насыщения, и часть магнитного потока выходила бы на поверхность мишени, создавая возможность возникновения магнетронного заряда [44].

## 2.2. Определение толщины покрытия

Анализ толщины никелевых покрытий проводился с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000S. В ходе проведения эксперимента использовались следующие параметры: скорость сканирования –  $2^\circ$  в минуту;

шаг сканирования – 0,03°; диапазон углов – 20-90°; накопление в точке – 1,5 секунды. Средний размер кристаллитов определялся с помощью уравнения Дебая-Шеррера по уширению дифракционных максимумов с учетом инструментального уширения и программного обеспечения PowderCell 2.4. Инструментальное уширение было определено на полуширине максимума стандартного порошка кремния и составило 0,14.

Глубина проникновения рентгеновского пучка варьировалась за счет изменения угла падения при ассиметричном сканировании. Уменьшение угла падения проводилось до полного устранения сигнала от подложки. Оценка толщины покрытий проводилась при помощи геометрии скользящего пучка по соотношению:

$$h = \frac{\ln(1-R) \sin \alpha \sin(2\theta - \alpha)}{\mu(\sin \alpha + \sin(2\theta - \alpha))}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол падения,  $\theta$  – угол скольжения (брэгговский угол),  $\mu$  – коэффициент линейного поглощения,  $R$  – доля излучения, отраженного слоем с толщиной  $h$ . При определении толщины никелевого покрытия величина  $R$  имела значение 0.95.

На рисунке 6 представлена схема получения дифракционной картины для тонких пленок при ассиметричном измерении.

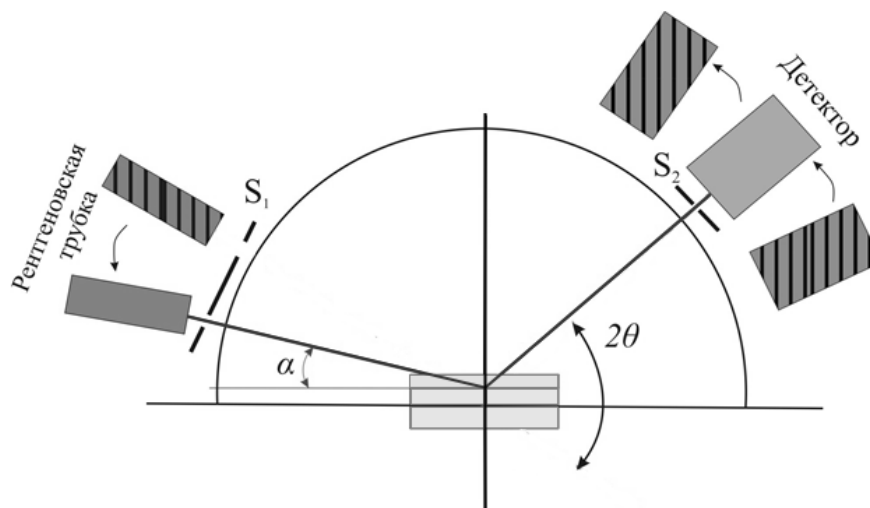


Рисунок 6 – Схема получения дифракционной картины для тонких пленок при ассиметричном измерении

В случае асимметричного измерения угол падения очень мал по отношению к поверхности образца, глубина проникновения рентгеновских лучей в тонкой пленке в этом случае составляет несколько мкм. Таким образом, техника асимметричного измерения позволяет получать высокие интенсивности пленки, тем самым подавляя картину от подложки.

### 2.3. Насыщение водородом из газовой среды

Насыщение образцов водородом проводилось из газовой среды при температуре 500 °С и давлении 2 атм. с помощью автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller, схема которого показана на рисунке 7.

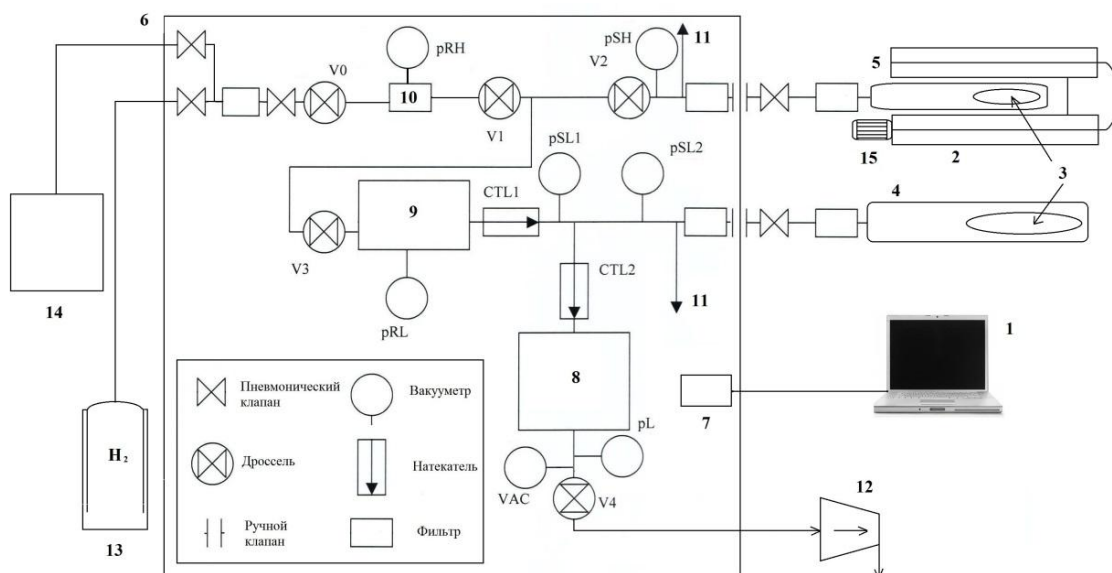


Рисунок 7 – Схема автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller: 1 – компьютер; 2 – печь/криостат; 3 – образец; 4 – камера низкого давления; 5 – камера высокого давления; 6 – контроллер; 7 – электронная система управления комплексом; 8 – резервуар; 9 – резервуар низкого давления; 10 – резервуар высокого давления; 11 – система экстренного удаления водорода; 12 – вакуумный пост; 13 – баллон с водородом; 14 – генератор водорода; 15 – система охлаждения [45]

Автоматизированный комплекс Gas Reaction Controller состоит из компьютера (1) с программным обеспечением на базе LabVIEW, высокотемпературной печи или криостата (2), камер для образцов (3): низкого

(4) и высокого (5) давлений и контроллера (6). Контроллер состоит из электронной системы управления комплексом (7) и вакуумной части. Вакуумная часть состоит из резервуара (8), резервуара низкого давления (9), резервуара высокого давления (10), системы пневмонических и ручных клапанов, дросселей, вакуумметров, натекателей и фильтров. В целях безопасности между резервуарами (низкого и высокого давления) и камерами для образцов установлены системы экстренного удаления водорода (11), через которые водород удаляется при превышении максимально допустимого давления. Для создания и поддержания вакуума в системе используется вакуумный пост (12), состоящий из форвакуумного мембранного и турбомолекулярного насосов. Водород в вакуумную систему подается из баллона (13) или генератора (14). Для предотвращения повреждений соединительных проводов вследствие нагрева между печью и контроллером установлена система охлаждения (15).

Эксперименты по изучению процессов сорбции и десорбции водорода выполняются в следующей последовательности: образец взвешивается, масса и плотность заносятся в программное обеспечение комплекса, образец помещается в камеру, камера подсоединяется к вакуумной системе и вакуумируется, осуществляется линейный нагрев (либо охлаждение) с непрерывной откачкой. Затем выполняется один из режимов: SOAK, RELEASE, PCI, Monitor. После завершения режима производится откачка водорода из камеры и охлаждение (либо нагрев) [45].

## **2.4. Измерение твердости**

Испытания на твердость подразделяются на статические и динамические. Существует много методов определения твердости материалов, но самыми распространенными из них являются методы Бриннеля, Роквелла и Виккерса. Эти способы определения твердости относятся к статическим испытаниям и заключаются во вдавливании индентора в виде стального

шарика, алмазного конуса или алмазной пирамидки в поверхность исследуемого образца. Для исследований образцов титанового и циркониевого сплава использовался метод Виккерса, так как является наиболее точным и универсальным [46].

Для определения твердости по этому методу используется алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $\alpha \approx 136^\circ$ . Индентор в виде пирамиды вдавливается в поверхность образца, оставляя отпечаток. Далее измеряются диагонали  $d$  этого отпечатка (рисунок 8).

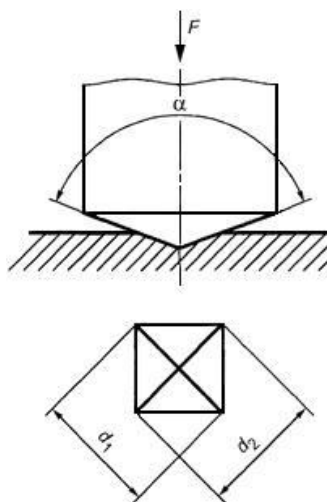


Рисунок 8 – Твердость по Виккерсу [47]

Число твердости обозначается  $HV$  и выражается формулой:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка,  $d$  – среднее арифметическое значение обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки. Величина нагрузки выбирается в соответствии с толщиной образца.

В методах испытания на твердость большое значение имеет подготовка образца. Все поверхностные дефекты должны быть удалены. Требования к качеству поверхности образца зависят от индентора и величины нагрузки. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем лучше должна быть отшлифована и отполирована поверхность. При этом необходимо следить за тем, чтобы свойства поверхностного слоя не изменились вследствие наклепа или разогрева при шлифовании и полировании.

Нагрузка прилагается перпендикулярно к испытываемой поверхности. Для этого плоскость поверхности образца должна быть строго параллельна опорной поверхности [48].

Для определения твердости образцов использовался автоматический микротвердомер KB30S. Твердость измерялась по методу Виккерса. Было сделано по 5 измерений для каждой нагрузки, которые менялись от 0,1 до 1 кг.

Схема микротвердомера KB30S представлена на рисунке 9.

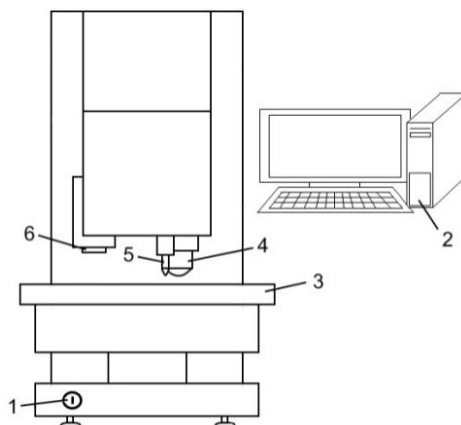


Рисунок 9 – Схема микротвердомера KB30S: 1 – кнопка включения, 2 – компьютер с программным обеспечением, 3 – координатный столик, 4 – объектив, 5 – индентор; 6 – камера

Для начала работы необходимо с помощью кнопки (1) включить микротвердомер, запустить программу на компьютере (2), положить подготовленный образец на координатный столик (3). С помощью объектива (4) определить участок на поверхности образца, на котором будет проводиться исследование. В процессе испытания индентор (5) внедряется в поверхность образца при заданной нагрузке. С помощью камеры (6) можно зафиксировать какой-либо участок поверхности. После снятия нагрузки программа по среднему значению длин диагоналей рассчитывает твердость.

### Глава 3. Экспериментальные результаты

В таблице 3 представлены результаты определения толщины никелевого покрытия после распыления в течение различного времени.

Таблица 3 – Значения толщины никелевого покрытия

Время напыления, мин	Толщина покрытия, мкм	
	Титановый сплав	Циркониевый сплав
10	0,6	1
20	2,5	1,8
30	3,3	2,6

На рисунках 10 и 11 представлены графики зависимости твердости по Виккерсу от глубины внедрения индентора для образцов титанового сплава BT1-0 и циркониевого сплава Э110.

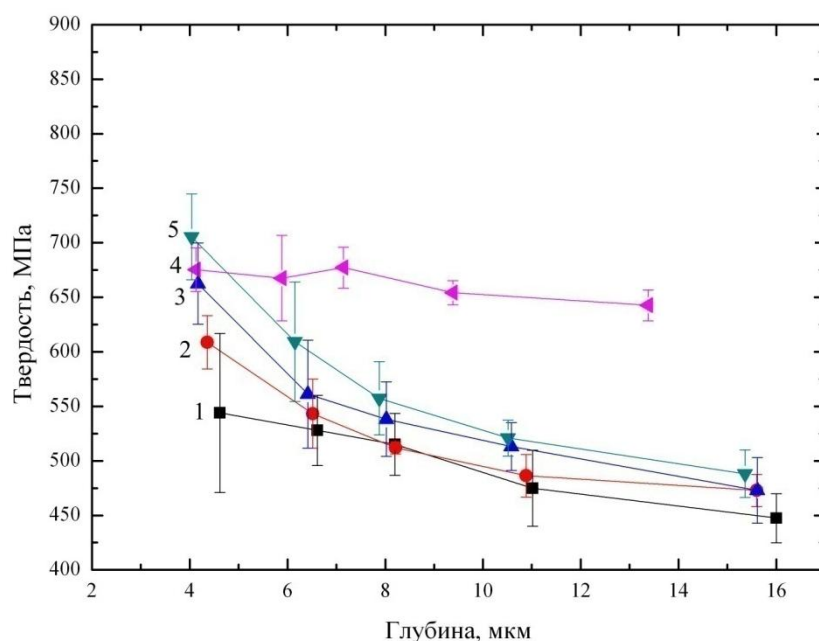


Рисунок 10 – Графики зависимости микротвердости по Виккерсу от глубины внедрения индентора для образцов титанового сплава BT1-0: 1 – исходный образец; 2 – образец с 10-минутным напылением никеля; 3 – образец с 20-минутным напылением никеля; 4 – никель; 5 – образец с 30-минутным напылением никеля



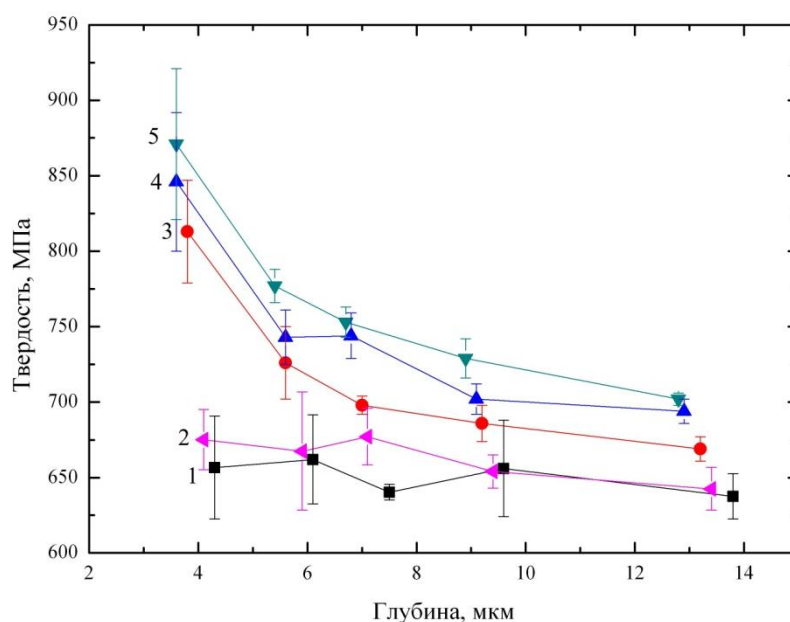


Рисунок 11 – Графики зависимости микротвердости по Виккерсу от глубины внедрения индентора для образцов циркониевого сплава Э110: 1 – исходный образец; 2 – никель; 3 – образец с 10-минутным напылением никеля; 4 – образец с 20-минутным напылением никеля; 5 – образец с 30-минутным напылением никеля

При уменьшении нагрузки индентора, с уменьшением размера отпечатка, полученные значения твердости могут увеличиваться. Это явление называется размерным эффектом. Об этом эффекте говорится в статьях [49-51]. Существует несколько объяснений размерного эффекта, но ни одно нельзя назвать исчерпывающим. К факторам, влияющим на возникновение этого эффекта, авторы статьи [52] относят отсутствие геометрического подобия формы индентора и отпечатка, особенности заточки индентора, наличие навалов при выдавливании материала. Несколько причин приведено в [53]:

1. влияние внешних вибраций;
2. наклеп поверхности при полировке;
3. увеличение относительной погрешности измерения размеров отпечатка;
4. большая относительная доля упругого восстановления для маленьких отпечатков;

5. индентирование «безлокационных» объемов с твердостью, приближающейся к теоретическому пределу, когда размер отпечатка становится соизмерим с междислокационными расстояниями;

6. наклеп во время индентирования;

7. влияние границ зерен и включений;

8. увеличение относительного влияния несовершенства индентора при уменьшении отпечатка.

По графикам видно, что твердость никеля выше твердости титанового сплава приблизительно на 200 МПа и циркониевого сплава на 40 МПа.

При напылении никелевого слоя на образцы титанового и циркониевого сплавов их твердость повышается на глубине в диапазоне 4...14 мкм. Полученные значения твердости растут при увеличении толщины никелевого покрытия. Это связано с тем, что при измерении твердости системы «покрытие-подложка» большое влияние оказывает никелевый слой, твердость которого выше титана и циркония.

На рисунках 12 и 13 представлены кривые сорбции для образцов титанового и циркониевого сплавов.

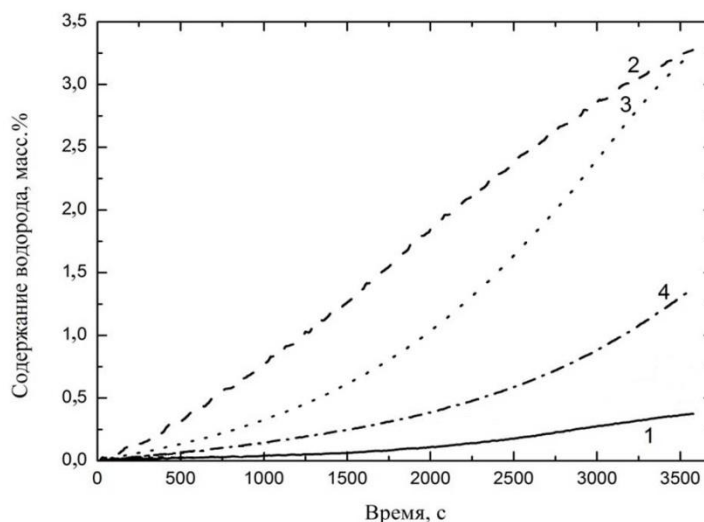


Рисунок 12 – Кривые сорбции для титанового сплава: 1 – исходный образец титанового сплава, 2 – образец с 10-минутным напылением никеля, 3 – образец с 20-минутным напылением никеля, 4 – образец с 30-минутным напылением никеля

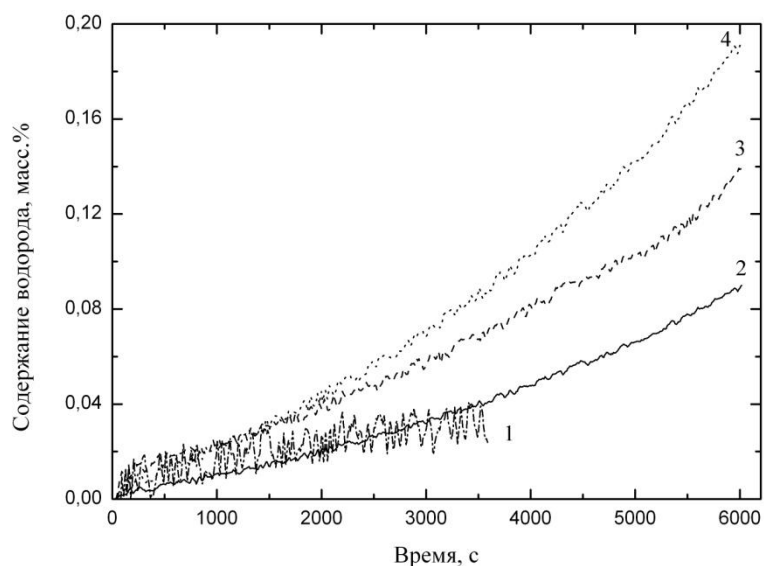


Рисунок 13 – Кривые сорбции для циркониевого сплава: 1– образец с 10-минутным напылением никеля, 2 – образец с 20-минутным напылением никеля, 3 – образец с 30-минутным напылением никеля

В таблице 4 представлены скорости сорбции водорода титановым и циркониевым сплавами, рассчитанные с помощью графиков из рисунка. Скорость сорбции рассчитывается как тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс.

Таблица 4 – Скорости сорбции

Титановый сплав				
Толщина покрытия, мкм	0	0,6	2,5	3,3
Скорость сорбции, масс.%/с	0,07	0,7	0,7	0,3
Циркониевый сплав				
Толщина покрытия, мкм	0	1	1,8	2,6
Скорость сорбции, масс.%/с	0,2	0,5	0,6	0,8

Сравнивая графики для титанового сплава можно сказать, что самая большая скорость поглощения водорода наблюдается у образцов с 10- и 20-минутным напылением никеля. Но графики имеют разный вид: для образца с 10-минутным напылением график близок к линейному виду, для образца с 20-минутным напылением линейная зависимость прослеживается на участках до 0,2 масс.% и от 1,5 масс.%. Эти участки соответствуют разным фазам. Для остальных образцов, с увеличением времени напыления, скорость сорбции падает.

Из графиков для циркониевого сплава видно, что с увеличением времени напыления никеля содержание водорода в образцах также повышается.

## **Глава 4. Социальная ответственность**

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест. При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства. Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в Томске, наиболее типичной чрезвычайной ситуацией является мороз.

### **4.1 Анализ вредных факторов производственной среды**

В лаборатории, где находятся различные электроустановки, могут возникнуть следующие вредные факторы: наличие некомфортных метеоусловий, производственного шума, недостаточной освещенности и электромагнитного излучения.

#### **4.1.1 Метеоусловия**

Микроклимат в производственном помещении включает в себя температуру, относительную влажность и скорость движения воздуха. Неблагоприятные метеоусловия в помещении могут вызвать перенапряжение механизмов терморегуляции, перегрев или переохлаждение организма.

Терморегуляция – способность организма при изменении микроклиматических условий регулировать теплообмен с окружающей средой, поддерживая температуру тела на постоянном уровне. Регулирование теплообмена осуществляется путем изменения количества вырабатываемого в организме тепла и путем увеличения или уменьшения передачи его в

окружающую среду. В комфортных условиях количество вырабатываемого тепла за единицу времени равно отданному теплу. Такое состояние называется тепловым балансом организма.

Организм человека начинает перегреваться или переохлаждаться, если параметры внешней среды отклоняются от комфортных.

Перегрев возникает при повышенной температуре воздуха, которая сопровождается высокой относительной влажностью и низкой подвижностью воздуха. Симптомы перегрева – учащенный пульс, слабость, головная боль, повышение температуры тела, обильное потоотделение.

Переохлаждение может возникать при пониженной температуре в сочетании с высокой влажностью и подвижностью воздуха. В случае переохлаждения понижается температура тела, сужаются кровеносные сосуды, нарушается работа сердечно-сосудистой системы [54].

Санитарными нормами микроклимата производственных помещений [55] установлены оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха с учетом тяжести выполняемой работы и периодов года.

В таблице 5 представлены оптимальные параметры микроклимата в производственных помещениях для легкой категории работ, к которой относятся работы, выполняемые сидя и не требующие физического напряжения.

Таблица 5 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более
Холодный	22-24	40-60	0,1
Теплый	23-25	40-60	0,1

К допустимым микроклиматическим нормам можно отнести параметры, которые способны вызвать изменение теплового состояния организма. При этом не возникает нарушений состояния здоровья, но могут ощущаться

дискомфорт, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности. Допустимые нормы устанавливаются в тех производственных помещениях, где по каким-либо причинам невозможно обеспечить оптимальные условия.

Допустимые параметры для легкой категории работ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с, не более	
	Ниже оптима л. значен ий	Выше оптима л. значен ий		Ниже оптималь. значений	Выше оптималь. значений
Холодный	20-21	24,1-25	15-75	0,1	0,1
Теплый	21-22	25,1-26	15-75	0,1	0,1

#### 4.1.2 Производственный шум

Шум – беспорядочное сочетание различных по частоте и силе звуков, мешающих человеческой деятельности и вызывающих неприятные ощущения. Источниками шума являются колеблющиеся тела, звуковые волны от которых вызывают периодическое повышение или понижение давления воздуха. На эти изменения давления и реагируют органы слуха. Ухо человека способно реагировать на изменения от  $2 \cdot 10^{-5}$  до 200 Па – эти величины являются пороговыми. Верхний порог слышимости также называют болевым порогом.

Продолжительное воздействие шума может привести к шумовой болезни – заболеванию организма, которое сопровождается поражением органов слуха и центральной нервной системы. Также шум вызывает головную боль, раздражительность, быструю утомляемость, потерю слуха, повышение артериального давления.

Допустимые нормы шума установлены санитарными нормами [56] и представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Допустимые уровни звукового давления

Полоса частот, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления, дБ	107	95	87	82	78	75	73	71	69
Уровни звука, дБА	80								
Эквивалентные уровни звука, дБА	80								

Предельно допустимый уровень шума – это уровень фактора, который при ежедневной работе не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Соблюдение предельно допустимого уровня шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

К СКЗ относятся: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. К СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.



### 4.1.3 Освещенность

Освещение на рабочем месте должно отвечать условиям работы и быть оптимальным по величине, а его спектр должен быть максимально приближен к дневному, лучше всего соответствующему физиологии человека. Слишком высокая освещенность, так же, как и недостаточная, вызывает быстрое утомление глаз и снижение видимости. Освещение должно быть достаточно равномерным по площади, так как при переводе взгляда с менее освещенных на более освещенные поверхности и наоборот происходит снижение остроты зрения на некоторый промежуток времени. Требования к освещению в производственных помещениях установлены сводом правил [57].

Оптимальные параметры освещения способствуют повышению работоспособности и оказывают положительное влияние на психологическое состояние человека.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим отраженный от потолка и стен световой поток. Длина помещения  $A = 6$  м; ширина  $B = 5$  м; высота  $H = 3$  м; высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 0,8$  м.

Площадь помещения:

$$S = A \cdot B = 6 \cdot 5 = 30 \text{ м}^2.$$

В помещении шесть потолочных светильников с четырьмя люминесцентными лампами с мощностью по 18 Вт (18х4) и световым потоком 1200 Лм. Длина светильника – 595 мм, ширина – 595 мм.

Критерий оптимальности расположения светильников – величина  $\lambda$ , для люминесцентных светильников с защитной решеткой лежит в диапазоне  $1,1 \dots 1,3$ . Принимаем  $\lambda = 1,1$ . Расстояние светильников от перекрытия  $h_c = 0,2$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3 - 0,8 - 0,2 = 2 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \text{ м.}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$N_b = B / L = 5 / 2,2 \approx 2.$$

Число светильников в ряду:

$$N_a = A / L = 6 / 2,53 \approx 3.$$

Общее число светильников:

$$N = N_a \cdot N_b = 3 \cdot 2 = 6.$$

Расстояние от рядов светильников до стены определяется по формуле:

$$l = L / 3 = 2,2 / 3 = 0,7 \text{ м.}$$

На рисунке 14 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

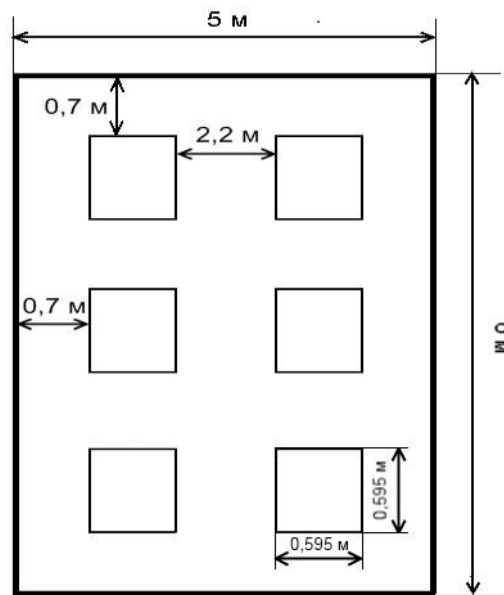


Рисунок 14 – План размещения светильников

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{6 \cdot 5}{2 \cdot (6 + 5)} = 1,4.$$

Коэффициент использования светового потока для светильников с люминесцентными лампами при коэффициенте отражения потолка  $\rho_{\Pi} = 70 \%$ ,

коэффициенте отражения стен  $\rho_c = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,4$  равен  $\eta = 0,57$ .

Потребный световой поток одной люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,57} = 1086 \text{ Лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{1200 - 1086}{1200} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{1200 - 1086}{1200} \cdot 100\% = 9,5 \, \%.$$

Таким образом,  $-10\% \leq 9,5\% \leq 20\%$  – необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

#### 4.1.4 Электромагнитные поля

Электромагнитное поле характерно для заряженных частиц. Переносчиком энергии является фотон электромагнитного излучения [58].

Источниками электромагнитного излучения являются компьютеры, телефоны, линии электропередач и т.д. В процессе выполнения данной работы использовался магнетрон, который является источником электромагнитных полей, поэтому необходимо учесть влияние излучений на организм человека.

Длительное воздействие электромагнитных излучений приводит к нарушениям в центральной нервной и сердечно-сосудистых системах, катаракте, ломкости ногтей и выпадению волос. Действие электромагнитных полей проявляется в виде быстрой утомляемости, слабости, головной боли, снижения частоты пульса и повышения температуры.

Отрицательное воздействие электромагнитного поля возрастает с повышением частоты, продолжительности и интенсивности излучения. Согласно санитарно-эпидемиологическим правилам [59] оценку

электромагнитных полей осуществляют отдельно по напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля. Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля на рабочем месте – 5 кВ/м, в случае магнитного поля предельно допустимый уровень определяется в зависимости от того, является излучение общим или локальным.

Ослабление мощности электрического поля достигается путем удаления источника излучения от рабочего места, либо путем экранирования источников излучения. К средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

## **4.2 Анализ опасных факторов производственной среды**

### **4.2.1 Факторы электрической природы**

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасные помещения).

Лаборатория относится к помещению с особой опасностью поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической

сети с помощью трансформаторов – в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности.

Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением выше 1000 В являются изолирующие штанги, указатели напряжения, а также изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ.

К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

Освобождение пострадавшего от действия тока напряжением свыше 1000 В может быть произведено только одним способом. Это отключение соответствующей части электрической установки специально обученными людьми.

#### **4.2.2 Факторы пожарной и взрывной природы**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории А<sub>н</sub>, Б<sub>н</sub>, В<sub>н</sub>, Г<sub>н</sub> и Д<sub>н</sub>.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории А – вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой или кислородом воздуха [60].

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 [61] (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причинами возникновения пожара неэлектрического характера являются халатное неосторожное обращение с огнем (оставленные без присмотра нагревательные приборы), утечка водорода.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- в) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- г) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

На рисунке 15 представлен план эвакуации из лабораторий, находящихся в цокольном этаже.

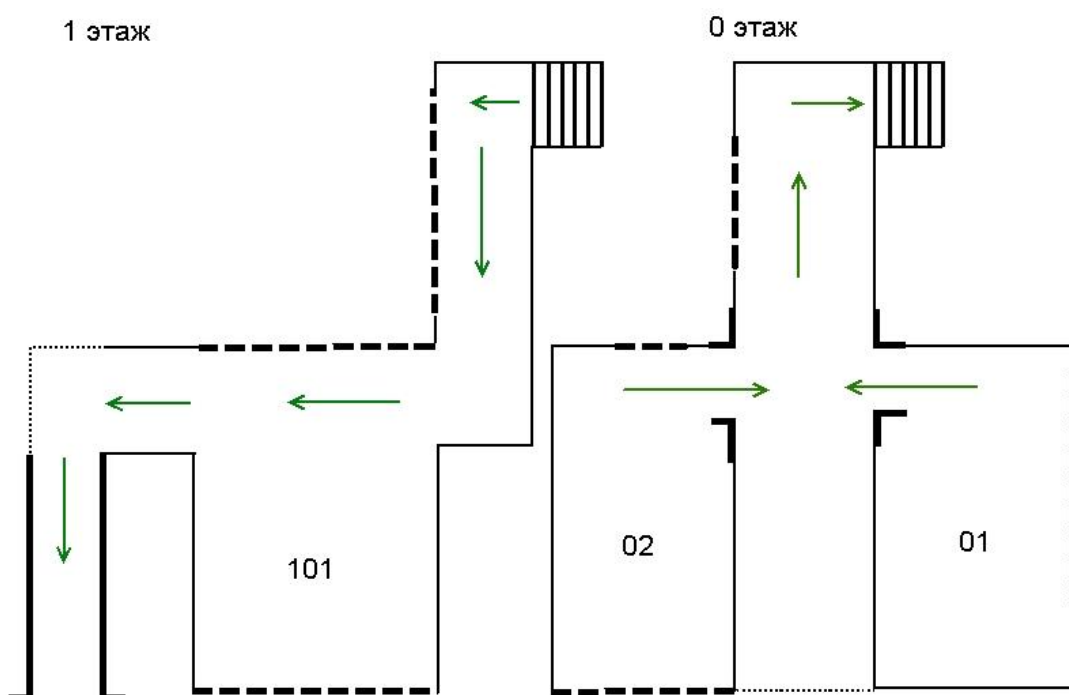


Рисунок 15 – План эвакуации из лаборатории

### 4.3 Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды – комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор водорода в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух).

Так же необходимо позаботиться о раздельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла,

металлических частей, пластика, резины и т. д. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

#### **4.4 Защита в ЧС**

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Такие природные явления, как землетрясения, наводнения, засухи, ураганы, в данном городе отсутствуют.

Возможными чрезвычайными ситуациями на объекте, в данном случае, могут быть сильные морозы, которые характерны для Сибири и диверсии. Достижение критически низких температур может привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы или обморожениям. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Зачастую такие угрозы оказываются ложными, но случаются взрывы и в действительности.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.



#### **4.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

1. ОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности
2. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”
3. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".
5. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
6. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
7. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
8. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
9. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
10. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
- ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
12. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
13. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
14. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.

15. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры
16. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"

## Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. Сегментом рынка называется группа потребителей, обладающих определенными общими признаками.

### 5.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ внутренней и внешней среды научно-исследовательского проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа представлены в таблице 8.

Таблица 8 – матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1.Наличие бюджетного финансирования. С2.Квалифицированный персонал. С3.Наличие необходимых установок для проведения испытаний. С4.Экономичность технологии. С5.Наличие материала для исследований.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1.Большой срок поставок материалов используемых при проведении научного исследования. Сл2.Длительность проведения некоторых исследований. Сл3.Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.
Возможности: В1.Использование		

инновационной инфраструктуры ТПУ. В2.Повышение производительности В3.Спрос на результаты исследований.		
Угрозы: У1.Несвоевременное фи- нансовое обеспечение научного исследования со стороны государства. У2.Отсутствие спроса на новые технологии производства.		

Второй этап заключается в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Для этого строится интерактивная матрица проекта (таблица 9).

Таблица 9 – Интерактивная матрица

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	0	+	+	+	0
	B2	–	+	+	–	+
	B3	–	+	+	–	0
Угрозы проекта	У1	+	–	0	0	+
	У2	–	–	–	0	–
Слабые стороны проекта						
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	
Возможности проекта	B1	–	0	0	–	
	B2	–	–	+	+	
	B3	–	0	–	+	
Угрозы проекта	У1	+	+	0	–	
	У2	–	–	–	+	

В таблице знак «+» означает сильное соответствие сильных сторон возможностям, знак «-» – слабое соответствие и «0» выражает сомнения в том, что поставить «+» или «-».

На третьем этапе SWOT-анализа строится итоговая матрица (таблица 10)

Таблица 10 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1.Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С2.Квалифицированный персонал.</p> <p>С3.Наличие необходимых установок для проведения испытаний.</p> <p>С4.Экономичность технологии.</p> <p>С5.Наличие материала для исследований.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1.Большой срок поставок материалов используемых при проведении научного исследования.</p> <p>Сл2.Длительность проведения некоторых исследований.</p> <p>Сл3.Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл4.Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2.Повышение производительности</p> <p>В3.Спрос на результаты исследований.</p>	<p>Наличие необходимых материалов и оборудования, а также персонала в процессе исследований может способствовать повышению производительности в будущем.</p>	<p>Для повышения производительности и спроса на результаты исследований необходимы квалифицированные кадры среди потенциальных потребителей.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p> <p>У2.Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p>	<p>Основной угрозой является несвоевременное финансирование – может возникнуть нехватка материалов для исследований.</p>	<p>Вследствие несвоевременного финансирования может возникнуть приостановка исследований на некоторое время.</p>

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура научно-исследовательских работ

В таблице 11 представлен перечень этапов и работ, а также распределение исполнителей по данным работам.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Создание образцов	Инженер
	5	Подготовка образцов к исследованиям	Студент
	6	Нанесение покрытий	Инженер
	7	Исследование на дифрактометре	Инженер
	8	Насыщение водородом	Инженер
	9	Исследование на микротвердомере	Студент
	10	Анализ результатов	Руководитель, студент
	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент
	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель
Оформление отчета по НИР	14	Написание дипломной работы	Студент

### 5.2.2 Разработка графика научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для ее построения необходимо вычислить некоторые показатели, а именно ожидаемое значение трудоемкости, продолжительность работ в рабочих и календарных днях.

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости определяется следующей формулой:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{mini}}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;  $t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

При известной ожидаемой трудоемкости работ можно вычислить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %. Продолжительность одной работы вычисляется по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переводится в календарные дни. Для этого применяется следующая формула:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_k, \quad (3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в рабочих днях;  $k_k$  – коэффициент календарности, который определяется как

$$k_k = \frac{T_k}{T_k - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $T_k$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

В таблице 12 представлены временные показатели проведения научного исследования, рассчитанные по данным формулам.

Таблица 12 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\min}$ , чел.-дни	$t_{\max}$ , чел.-дни	$t_{\text{ож}}$ , чел.-дни			
Составление и утверждение технического задания	3	5	4	Руководитель	4	6
Выбор направления исследований	2	5	3	Руководитель	3	4
Подбор и изучение материалов по теме	60	90	72	Руководитель, студент	36	53
Создание образцов	20	30	24	Инженер	24	35
Подготовка образцов к исследованиям	10	15	12	Студент	12	18
Нанесение покрытий	14	21	17	Инженер	17	25
Исследование на дифрактометре	5	8	6	Инженер	6	9
Насыщение водородом	7	15	10	Инженер	10	15
Исследование на	9	14	11	Студент	11	16



микротвердомере						
Анализ результатов	30	40	34	Руководитель, студент	17	25
Сопоставление результатов экспериментов с теорией	20	35	26	Руководитель, студент	13	19
Оценка эффективности полученных результатов	7	9	8	Руководитель, студент	4	6
Определение целесообразности проведения ОКР	3	7	5	Руководитель	5	7
Написание дипломной работы	80	100	88	Студент	88	130

Пример расчета:

Ожидаемое значение трудоемкости:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 3 + 2 \cdot 5}{5} = 4 \text{ чел. – дн.}$$

Продолжительность работы в рабочих днях:










$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i} = \frac{4}{1} = 4.$$






Продолжительность работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot \frac{T_k}{T_k - T_{вых} - T_{пр}} = 4 \cdot \frac{365}{365 - 104 - 14} = 6.$$

На основании данных таблицы 12 строится календарный план-график (таблица 13).

Таблица 13 – Календарный план-график

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>кi</sub> , дн.	Продолжительность выполнения работ																																			
				июнь			июль			август			сентябрь			октябрь			ноябрь			декабрь			январь			февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	6																																				
2	Выбор направления исследований	Руководитель	4																																				
3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент	53																																				
4	Создание образцов	Инженер	35																																				
5	Подготовка образцов к исследованиям	Студент	18																																				
6	Нанесение покрытий	Инженер	25																																				
7	Исследование на дифрактометре	Инженер	9																																				
8	Насыщение водородом	Инженер	15																																				
9	Исследование на	Студент	16																																				

	микротвердомере														
10	Анализ результатов	Руководитель, студент	25												
11	Сопоставление результатов экспериментов с теорией	Руководитель, студент	19												
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент	6												
13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	7												
14	Написание дипломной работы	Студент	130												



– студент



– руководитель



– инженер

### 5.2.3 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета научно-технического исследования используется следующая группировка затрат: затраты на материалы для исследований и оборудование; основная и дополнительная заработная плата исполнителей работы; отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления); затраты научные и производственные командировки; контрагентные и накладные расходы.

#### 4.2.3.1 Расчет материальных затрат

В этом разделе учитывается стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (5)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;  $N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию;  $C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов;  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты данной исследовательской работы представлены в таблице 14.

Таблица 14 – материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Титановый сплав ВТ1-0	м <sup>2</sup>	0,1	1550	155
Циркониевый сплав Э110	м <sup>2</sup>	0,1	3800	380
Никель (мишень)	шт.	1	6198	6198
Наждачная бумага	шт.	30	30	900
Водород	1 м <sup>3</sup>	0,5	2307	1153,5
Итого				8786,5

Пример расчета затрат на материалы:

$$З_{м} = 1 \cdot 1550 \cdot 0,1 = 155 \text{ руб.}$$

### **5.2.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ**

В данном разделе учитываются затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения исследовательской работы.

Затраты на приобретение оборудования для научной работы представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Затраты на приобретение спецоборудования

№	Наименование оборудования	Общая стоимость, тыс. руб.
1	Автоматизированный комплекс «Gas Reaction Controller»	4500
2	Микротвердомер KB30S	500
3	Установка «Радуга-спектр»	8000
4	Дифрактометр Shimadzu XRD-7000S	8000
Итого		21000

### **5.2.3.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы**

Основная заработная плата рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы: оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями; стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд и выполнение дополнительных обязанностей.

В раздел включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников непосредственно участвующих в выполнении работ. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая

ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы представлен в таблице.

Полная заработная плата включает в себя основную и дополнительную (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ):

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}. \quad (6)$$

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (8)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя);  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени (таблица 16).

Таблица 16 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Количество дней
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	118
Отпуск	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	199

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p, \quad (9)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;  $k_p$  – районный коэффициент (для Томска равен 1,3).  $k_{\text{пр}}$  и  $k_d$  в данной работе не учитываются.

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Расчет основной и дополнительной заработной платы приведён в таблице 17.

Таблица 17 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	$З_{\text{тс}}$ , руб.	$k_p$	$З_{\text{м}}$ , руб.	$З_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$З_{\text{осн}}$ , руб.	$З_{\text{доп}}$ , руб.
Руководитель	14584,3	1,3	18959,6	990,9	82	81253,8	9750,5
Инженер	8552	1,3	11117,6	581	57	33117	3974
Студент	6976	1,3	9068,8	473,9	178	84354,2	10122,5
Итого						198725	23847

Пример расчета:

месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = 14584,3 \cdot 1,3 = 18959,6 \text{ руб.};$$

среднедневная заработная плата:

$$З_{\text{дн}} = \frac{18959,6 \cdot 10,4}{199} = 990,9 \text{ руб.};$$

основная заработная плата:

$$З_{\text{осн}} = 990,9 \cdot 82 = 81253,8 \text{ руб.}$$

дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 81253,8 = 9750,5 \text{ руб.}$$

#### **5.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

Отчисления во внебюджетные фонды – обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется следующей формулой:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (11)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится коэффициент – 0,271.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Сумма, руб.
Руководитель	24662,2
Инженер	10051,7
Студент	25603,2
Итого	60317,1

Пример расчета величины отчислений во внебюджетные фонды:

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot (81253,8 + 9750,5) = 24662,2 \text{ руб.}$$

### 5.2.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации: печать и ксерокопирование, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется по формуле:

$$З_{накл} = k_{нр} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (12)$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (равен 0,16).

Накладные расходы представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Накладные расходы

Исполнители	Сумма, руб.
Руководитель	14560,7
Инженер	5934,6
Студент	15116,3
Итого	35611,6



Пример расчета накладных расходов:

$$З_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (81253,8 + 9750,5) = 14560,7 \text{ руб.}$$

### 5.2.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Затраты научно-исследовательского проекта представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет бюджета затрат

Наименование	Сумма, руб.
Материальные затраты	8786,5
Затраты на оборудование	21000000
Затраты по основной заработной плате	198725
Затраты по дополнительной заработной плате	23847
Отчисления во внебюджетные фонды	60317,1
Накладные расходы	35611,6
Бюджет затрат	21295237,2

## 5.3 Определение сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (13)$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (14)$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки.

В таблице 21 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. За исполнение 1 принято привлечение к данной работе персонала из сторонних организаций, за исполнение 2 – использование ресурсов (спецоборудования и материалов) другого предприятия.

Таблица 21 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Исп.1	Исп.2
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	4	3
Соответствует требованиям потребителей	0,15	4	4	5
Энергосбережение	0,2	4	3	4
Надежность	0,2	5	4	4
Материалоемкость	0,2	4	5	5
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,45	4	4,1

Пример расчета интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 4,45.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{финр}}}. \quad (15)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д.п.}}}{I_{\text{исп}}}. \quad (16)$$

В таблице 22 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 22 – Сравнительная эффективность

№	Показатели	Данный проект	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель	1	0,9	0,88
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,45	4	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	4,45	4,44	4,67
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	–	1	0,95

Пример расчета:

интегральный финансовый показатель:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп1}} = \frac{21161784,6}{21161520} \cong 1;$$

интегральный показатель эффективности:

$$I_{\text{исп}} = \frac{4,45}{1} = 4,45.$$

сравнительная эффективность вариантов исполнения:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{4,45}{4,44}.$$

По данным этой таблицы видно, что, в общем, данный проект является более эффективным по сравнению с аналогами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что с увеличением времени напыления от 10 до 30 минут увеличивается толщина покрытия от 0,6 до 3,3 мкм для титанового сплава и от 1 до 2,6 для циркониевого сплава.

Установлено, что с увеличением времени напыления увеличивается и значение твердости поверхностного слоя. При глубине внедрения индентора в поверхность образца равной 16 мкм значения твердости для всех образцов существенно не отличаются.

По результатам наводороживания были получены графики сорбции. Наибольшая скорость поглощения наблюдается у образцов титанового сплава с 10- и 20-минутным временем напыления, при этом содержание водорода в этих образцах превышает содержание водорода в исходном образце на порядок. С дальнейшим увеличением времени напыления никеля скорость сорбции падает.

Скорость сорбции исходного образца циркониевого сплава несущественно отличается от образца с 10-минутным временем напыления. При дальнейшем увеличении времени напыления (от 20 до 30 минут) скорость сорбции возрастает.

## Список использованных источников

1. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / Под ред. Барона Ю.М. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.
2. Иолтуховский А.Г., Калинин Б.А., Шмаков А.А. Водородное охрупчивание и гидридное растрескивание циркониевых элементов легководных реакторов: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2001. – 44 с.
3. История атомной энергетики Советского Союза и России / Под ред. Сидоренко В.А. – Выпуск 2, второе издание. – М.: ИздАТ, 2009. – 432 с.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – 4-е изд., перераб. – М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2009. – 528 с.
5. Глинка Н.Л. Общая химия: Учебное пособие для вузов. – изд. 30-е, исправленное – М.: Интергал-Пресс, 2003. – 728 с.
6. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Куткин А.Б. Материаловедение. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 339 с.
7. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М., Гаврилюк В.С., Соколов В.С., Соколова Н.Х., Тутатчикова Л.В., Спирихин И.П., Гольцов В.А. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высшая школа, 2001. – 639 с.
8. Чинков Е.П., Багинский А.Г. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 230 с.
9. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. Пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. – 312 с.
10. Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. и др. Справочник по конструкционным материалам. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.
11. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия: Учеб. для вузов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., Изд. центр «Академия», 2001. – 743 с.

12. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1966. – 256 с.
13. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
14. Черданцев Ю.П., Чернов И.П., Тюрин Ю.И. Методы исследования систем металл-водород. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 286 с.
15. Черняева Т.П., Остапов А.В. Водород в цирконии. Часть 1 // ВАНТ. – 2013. – №5(78). – с. 16-31.
16. Суранов Г.И. Водород: разрушение, изнашивание, смазка деталей машин: монография. – Ухта: УГТУ, 2015. – 224 с.
17. Таразанова Е.И., Кретьова О.М. Исследование сорбционных и механических свойств титана ВТ1-0 при наводороживании из газовой среды // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2010. – Т. 2. – С. 144-146.
18. Перевалова О.Б., Панин А.В., Кретьова О.М. Водород в техническом титане // Вестник Восточно-украинского национального университета им. Вл. Даля. – 2013. - №9(198). – Ч.1. – С. 120-124.
19. Xu J.J., Cheung H.Y., Shi S.Q. Mechanical properties of titanium hydride // Journal of alloys and compounds. – 2007. – Т. 436. – №. 1. – С. 82-85.
20. Глебов Г.Д. Поглощение газов активными металлами. – М.-Л.: Госэргориздат, 1961. – 184 с.
21. Химический портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.himikatus.ru/index.php/>
22. Terrani K.A., Balooch M., Wongsawaeng D., Jaiyen S., Olander D.R. The kinetics of hydrogen desorption from and adsorption on zirconium hydride // Journal of Nuclear Materials, 2010, vol. 397, №1-3, p. 61-68.

23. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
24. Никулин С.А. Циркониевые сплавы для ядерных энергетических реакторов. Жаропрочные и радиационностойкие материалы: учебное пособие. – М.: Учеба, 2007. – 92 с.
25. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Metallurgy, 1974. – 544 с.
26. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
27. Lewis F.A. Solubility of hydrogen in metals // Pure & Appl. Chem. – 1990. – 62, №11. – p. 2091-2096.
28. Тюрин Ю.И., Чернов И.П. Аккумулирующие свойства водорода в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 285 с.
29. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – Пер. с нем. – М.: Metallurgy, 1974. – 512 с.
30. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – Киев: Наукова думка, 1976. – 127 с.
31. Гельд П.В., Рябов Р.А., Мохрачева Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов: Гидриды переходных металлов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 232 с.
32. Mc Quillan A.D. – «Proc. Roy. Soc.», 1951. – 204A, №1078. – p. 309–323.
33. Черданцев Ю.П., Чернов И.П., Тюрин Ю.И. Методы исследования систем металл-водород: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 286 с.
34. Hong E., Dunand D.C., Choe H. Hydrogen-induced transformation superplasticity in zirconium // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – 35, №11. – p. 5708-5713.

35. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
36. Коррозия и защита химической аппаратуры. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. Том 9 / Под ред. Сухотина А.М., Шрейдера А.В., Арчакова Ю.И. – Ленинград: Изд-во «Химия», 1974. – 576 с.
37. Багрянский К.В., Кузьмин Г.С. Сварка никеля и его сплавов. – М.: Машгиз, 1963. – 164 с.
38. Ваграмян А.Т., Жамагорцяц М.А., Электроосаждение металлов и ингибирующая адсорбция. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 199 с.
39. Катализ. Электронные явления / Под ред. Баландина А.А., Бонч-Бруевича В.Л., Рогинского З.Р. – пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1958. – 390 с.
40. Навалихина М.Д., Крылов О.В. Гетерогенные катализаторы гидрирования / Успехи химии, 1998, Том 67, №7, с. 656-687.
41. Панченко Е. В., Скаков Ю. А., Криммер Б. И., Арсентьев П. П., Попов К. В., Цвилинг М. Я. Лаборатория металлографии. – 2-е изд., доп. – М.: Металлургия, 1965. – 440 с.
42. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Часть 1. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 397 с.
43. Вдовичев С.Н. Современные методы высоковакуумного напыления и плазменной обработки тонкопленочных металлических структур. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2012. – 60 с.
44. Юрков А.Н., Власова Т.В., Крикунов Г.А., Кононов Использование планарного магнетрона для напыления ферромагнитных пленок микронной и нанометровой толщины // Прикладная физика. – 2010. – №. 3. – С. 103-108.



45. Кудияров В. Н., Лидер А. М. Изучение процессов сорбции и десорбции водорода при помощи автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller LP. – 2013. - №.10. – С. 3466-3471.

46. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 230 с.

47. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-6507-1-2007/>

48. Золотаревский В.С. Механические свойства материалов. М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

49. Мощенок В.И., Дощечкина И.В., Ляпин А.А. Размерный эффект в значениях твердости материалов // Вестник ХНАДУ. – 2008. – № 41.

50. Фирстов С.А., Игнатович С.Р., Закиев И.М. Размерный эффект при микро- и наноиндентировании и его компенсация с учетом особенности начального контакта // Проблемы прочности. – 2009. – №2. – С. 43-54.

51. Iost A., Bigot R. Indentation size effect: reality or artifact? // J. Mater. Sci. – 1996. – 31, № 13. – P. 3573-3577.

52. Мощенок В.И. Наноиндентирование и нанотвердость материалов // Автомобильный транспорт. – 2008. – №22.

53. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с.

54. Беляков Г.И. Охрана труда и техника безопасности: учебник для прикладного бакалавриата. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 404 с.

55. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

56. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

57. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
58. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник для бакалавров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2013. – 682 с.
59. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях.
60. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
61. СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы. Огнестойкость зданий, сооружений и пожарных отсеков.

## Приложение А

### Раздел 2 Материалы и методы исследований

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Югова Ирина Сергеевна		

Консультант кафедры ОФ ФТИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой	Лидер Андрей Маркович	к. ф.-м. н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ ФТИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Данейкина Наталья Викторовна			

## **Chapter 2. Materials and methods**

In process of the studies used a titanium alloy sample size VT1-0 20x20x1 mm and samples of zirconium alloy E110 size 20x20x0,6 mm.

Titanium alloy VT1-0 (technical titanium) contains in wt%: titanium - 99.2; iron - 0.18; carbon - 0.07; silicon - 0.1; nitrogen - 0.04; oxygen - 0.12; hydrogen - 0.01 other impurities - 0.3. The zirconium alloy contains 99 wt.% Zirconium and 1 mass.% Niobium.

By using sandpapers with different grain sizes were polished sample surface, and then held vacuum annealing of titanium at a temperature of 750 ° C for 60 min and zirconium at a temperature of 580 ° C for 180 min.

### **2.1 Deposition of coatings**

Deposition of the nickel layer on the surface of the samples was performed on the "Raduga-spectr", which is designed to implement hybrid technologies ion-plasma modification of properties of the surface layers, including the deposition of single-layer and multi-layer coatings of a wide range method of condensing substances with ion assistance on the product. The scheme of installation is presented in figure 4.

The unit includes: a vacuum chamber; the ion source gas, source gas plasma; vacuum arc metal plasma generator; a source of accelerated electrons; a magnetron; a source of bias potential; a cooling system; vacuum system; power supply system; steering system of inlet gases and their mixtures; strut with the control system and power supply; strut installation.

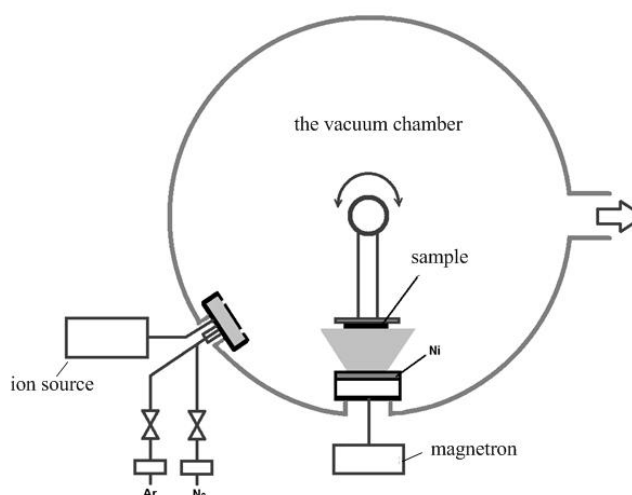


Figure 4 – The scheme of installation "Raduga-spectr"

The ion source is used for cleaning the surface of materials in the vacuum chamber before deposition to them coatings by spraying. Surface cleaning is carried out by sputtering of atoms of the scattering on them the accelerated ions generated by the ion source. Ionic cleaning is done by way of accelerated gas ions accelerated in the diode system of direct action; the energy of the ions is in the range 0 ... 3.5 keV.

As the plasma generators in an installation applied vacuum arc evaporator and magnetron.

The magnetron is designed for the deposition of metal and oxide thin-film coatings on various materials. The principle of operation is based on the spraying surface of the target by the gas-discharge plasma, located in crossed electric and magnetic fields (figure 5).

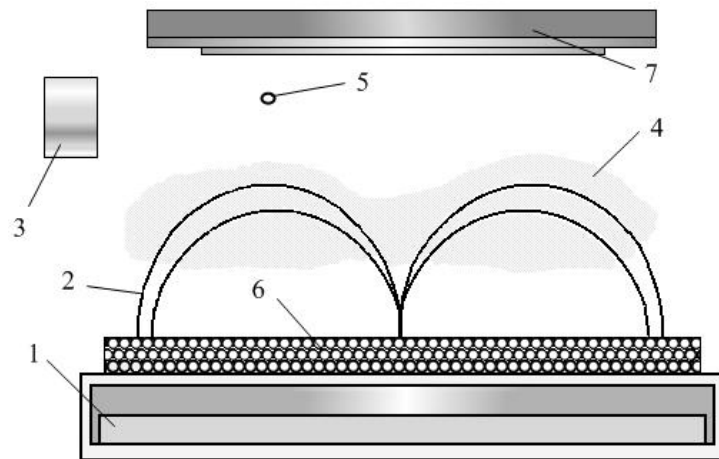


Figure 5 – The operation principle of the magnetron: 1 – cathode, 2 – target, 3 – plasma, 4 – substrate, 5 – atom sputtering material, 6 – argon gun, 7 – the magnetic field lines

The magnetron is a two-electrode system, a cathode which is a source material (1). The magnetic field lines (2) perpendicular to the electric field lines and pass through the surface of the cathode. Using an argon gun (3) creates a low pressure plasma (4) on the cathode and the sputtering of atoms (5) target (6) and their deposition on a substrate (7). With the help of a strong magnetic field is achieved by localization of the plasma near the surface of the sputtering target and increases the density of ion current.

On the basis of the installation mode of ion cleaning and surface activation of workpieces through the use of vacuum arc plasma generator continuous is realized. The deposition of coatings produced by the method of condensation of substance from plasma to the surface of a workpiece in a vacuum with plasma-immersion ion assisting.

A workpiece is placed on the panel rotation mechanism, located in the middle of the vacuum chamber. Download of the products in the vacuum chamber is carried through the cell door. The low pressure in the working chamber of the installation creates a vacuum system located near the strut installation. For protection of the facility from overheating, use cooling system.

The samples were fixed on a holder and placed in the chamber of the installation. Limiting residual pressure in the chamber was  $2.5 \cdot 10^{-3}$  Pa. Surface

cleaning was carried out directly in the camera settings before spraying the coating, ion beam of argon, with parameters presented in table 1. The deposition of the Nickel coating was carried out by magnetron sputtering modes are presented in table 2. As a target used Nickel brand H0, the degree of purity of which is 99.99%.

Table 1 – Parameters of ion cleaning the surface

Gas	U, V	W, Vt	I, A	P, Pa	t, min
Ar	1800-2000	1000	0,5	$6 \times 10^{-2}$	3

Table 2 – Parameters of the magnetron sputtering of Nickel

U, V	W, Vt	I, A	P, Pa
540	2000	3	$1,1 \times 10^{-1}$

The use of ferromagnetic targets should lead to the fact that the magnetic flux closes within the target, and a magnetic discharge does not occur. But in this work we use a target of small thickness in order for the magnetic flux generated by the magnetic system of the magnetron, given the material of the target into a state of magnetic saturation, and a part of the magnetic flux would go to the surface of the target, creating the possibility of appearance of magnetron charge.

## 2.2. Determination of coating thickness

Analysis of the thickness of the Nickel coatings was carried out using a diffractometer Shimadzu XRD-7000S. During the experiment following parameters were used: scan rate  $2^\circ$  per minute; step scan of  $0.03^\circ$ ; the angle range is  $20-90^\circ$ ; the accumulation at the point – of 1.5 seconds. The average size of crystallites was determined using the equation of Debye-Scherrer broadening of the diffraction peaks taking into account instrumental broadening and the software PowderCell 2.4. The instrumental broadening was determined on the half-width of a standard silicon powder and the maximum was 0.14.

The penetration depth of the x-ray beam was varied by changing the angle of incidence of the asymmetric scan. Reducing the angle of incidence was carried out to

eliminate the signal from the substrate. Evaluation of the thickness of the coatings was conducted using the geometry of the moving beam by the relation:

$$h = \frac{\ln(1-R)\sin\alpha\sin(2\theta-\alpha)}{\mu(\sin\alpha+\sin(2\theta-\alpha))}, \quad (1)$$

where  $\alpha$  is the angle of incidence,  $\theta$  is the angle of sideslip,  $\mu$  is the linear coefficient of absorption,  $R$  is the proportion of radiation reflected by the layer with thickness  $h$ . When determining the thickness of the Nickel coating, the value of  $R$  had a value of 0.95.

Figure 6 represented the scheme for obtaining diffraction patterns for thin films with asymmetric dimension.

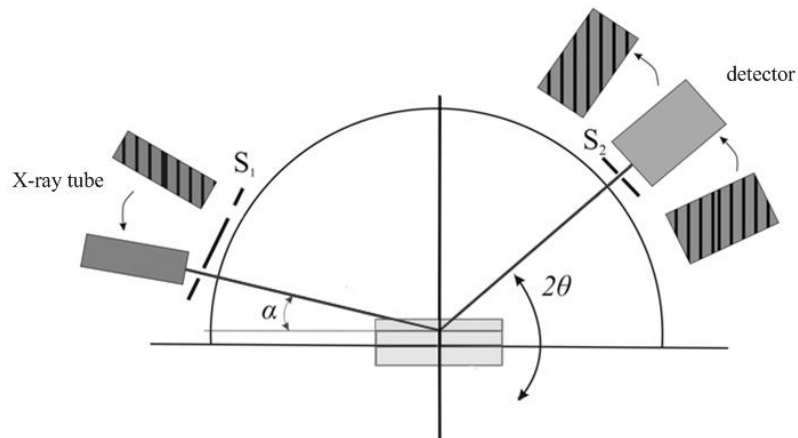


Figure 6 – Scheme of obtaining diffraction patterns for thin films with asymmetric dimension

In the case of asymmetrical measurement of the angle of incidence is very small relative to the sample surface, the depth of penetration of x-rays in a thin film in this case is a few microns. Thus, asymmetric measurement technique allows to obtain high intensity of the film, thereby suppressing the pattern from the substrate.

### 2.3. Saturation by hydrogen from the gaseous environment

Saturation of samples by hydrogen was carried out from the gaseous environment at a temperature of 500 °C and a pressure of 2 atm with the help of automated complex Gas Reaction Controller whose scheme is shown in figure 7.



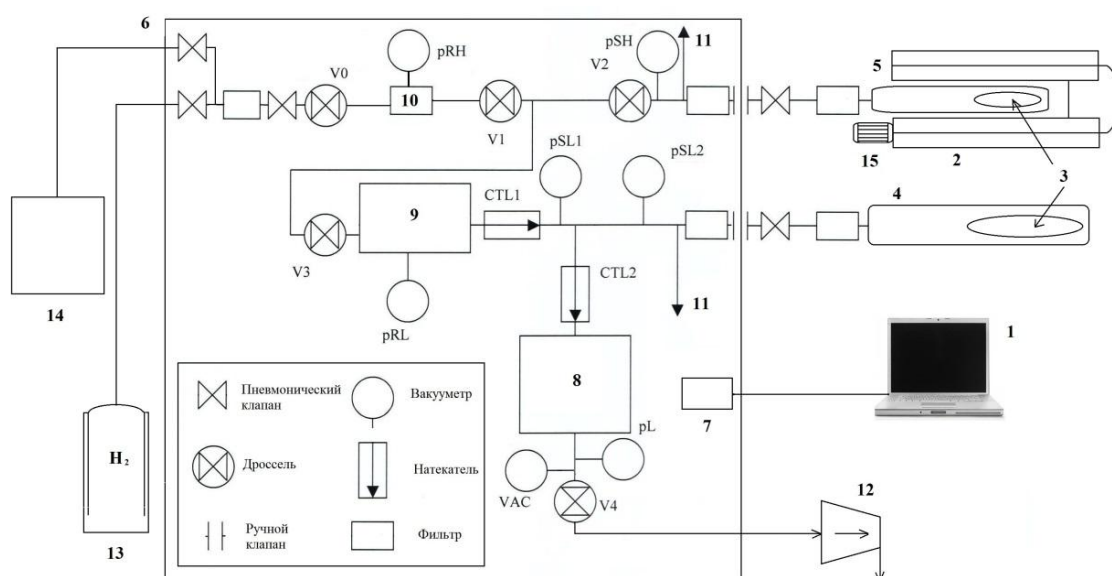


Figure 7 – Scheme of automated complex Gas Reaction Controller: 1 – computer; 2 – the furnace/cryostat; 3 – sample; 4 – low-pressure chamber; 5 – high pressure cell; 6 – controller; 7 – electronic control system complex; 8 – tank; 9 – low pressure tank; 10 – high pressure tank; 11 – emergency removal of hydrogen; 12 – vacuum post; 13 – a tank of hydrogen; 14 – hydrogen generator; 15 – cooling system

Automated complex Gas Reaction Controller consists of a computer (1) software on the basis of LabVIEW, a high-temperature furnace or cryostat (2), chambers for samples (3): low (4) high (5) pressure controller (6). The controller consists of an electronic control system of complex (7) and the vacuum part. The vacuum part consists of a tank (8), the low pressure tank (9), the high pressure tank (10), the system of pneumatic and manual valves, chokes, gauges and filters. For security purposes between the tanks (high and low pressure) and cameras for samples established the system for emergency removal of the hydrogen (11) through which hydrogen is removed when the maximum permissible pressure. To create and maintain vacuum in the vacuum system uses the post (12), consisting of a backing membrane and turbomolecular pumps. The hydrogen in the vacuum system is supplied from a balloon (13) or generator (14). To prevent damage to the connecting wires due to heating between the furnace and the controller installed cooling system (15).

Experiments to study the processes of sorption and desorption of hydrogen is performed in the following sequence: the sample is weighed mass and density are entered in the software, the sample is placed in the camera, the camera is connected to a vacuum system and evacuated, is linear heating (or cooling) with continuous pumping. Then executed one of the modes: SOAK, RELEASE, PCI, Monitor. After completion of the mode is made by pumping hydrogen from the chamber and cooling (or heating).

## 2.4. Testing hardness

Testing hardness are divided into static and dynamic. There are many methods of determining the hardness of materials, but the most common are methods Brinell, Rockwell and Vickers. These methods of testing hardness are static tests and are in the indentation of the indenter in the form of a steel ball, diamond cone or diamond pyramid into the surface of the test specimen. For research samples of titanium and zirconium alloy was used the method of Vickers, as it is the most accurate and universal.

For determining hardness by this method uses a diamond square pyramid with apex angle  $\alpha \approx 136^\circ$ . The indenter pyramid is pressed into the surface of the sample, leaving an imprint. Then measured diagonally in this imprint (figure 8).

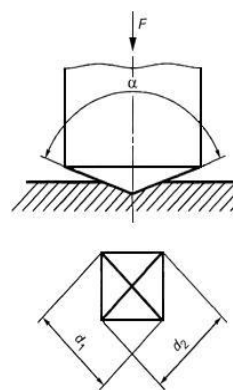


Figure 8 – Hardness by Vickers

Hardness number is indicated by HV and is given by:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

where  $P$  is load,  $d$  is the arithmetic mean of the two diagonals of the imprint after removing the load. The load is selected in accordance with the thickness of the sample.

Methods of testing hardness is of great importance to the preparation of the specimen. All surface defects should be removed. Requirements for the quality of the sample surface depend on the indenter load value. The smaller the indentation depth, the better it needs to be sanded and polished surface. It is necessary to ensure that the surface has not changed as a result of peening or heating, sanding and polishing. The loads are applied perpendicular to the test surface. For this purpose the plane of the sample surface should be parallel to the support surface. To determine the hardness of the samples was used automatic hardness tester KB30S. Hardness was measured by Vickers. It was made 5 measurements for each load, which was varied from 0.1 to 1 kg.

The scheme of hardness testing KB30S presented in figure 9.

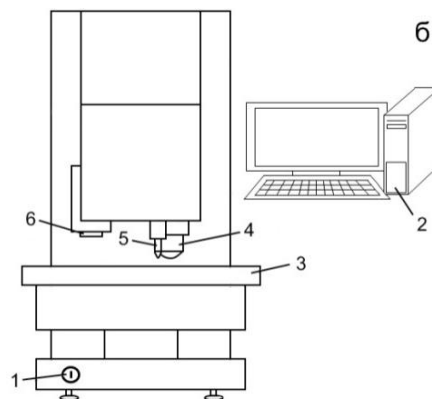


Figure 9 – Diagram of hardness testing KB30S: 1 – power button 2 – computer software 3 – coordinate table, 4 – lens, 5 – indenter; 6 – camera

To get started need using the power button (1) to include hardness testing, to launch a program on the computer (2), put the prepared sample in the coordinate table (3). With the help of a lens (4) to determine the area on the surface of the sample, which will be investigated. During the test, the indenter (5) is pressed in the surface of the sample under a given load. Using the camera (6) can be fixed to any piece surface. After removal of the load the program at the average value of the lengths of the diagonals calculates the hardness.